

Численное моделирование стратифицированных течений с использованием OpenFOAM

¹*Н.Ф. Димитриева <dimitrieva@list.ru>*

²*Я.В. Загуменный <zagumennyi@gmail.com>*

¹*ИПМехРАН, 119526, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д.101, корп. 1*

²*ИГМНАНУ, 03680, Украина, г. Киев, ул. Желябова, д.8/4,*

Аннотация. Работа посвящена построению численной модели и расчету течений непрерывно стратифицированных жидкостей в поле внешних массовых сил с учетом диссипативных факторов – эффектов вязкости и диффузии. Математическое моделирование проводится на основе фундаментальной системы дифференциальных уравнений механики неоднородных многокомпонентных жидкостей. В полной нелинейной постановке решение поставленной задачи строится численно с использованием метода конечных объемов в рамках открытого пакета OpenFOAM. Для учета эффектов стратификации и диффузии был разработан и протестирован собственный решатель stratifiedFoam, созданный на базе стандартных расширенных инструментов пакета. Внимание уделяется созданию качественной расчетной сетки, удовлетворяющей требованиям разрешения всех микромасштабных задач в областях высоких градиентов физических переменных. Расчеты, проведенные в параллельном режиме с использованием вычислительных ресурсов web-лаборатории UniHUB, показали высокую работоспособность предложенной численной модели и хорошее согласие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование; открытые вычислительные пакеты; стратифицированные течения.

1. Введение

Исследования последних лет показали, что природные системы обладают «тонкой структурой», в которой области со сравнительно медленными изменениями параметров разделяются более тонкими границами с высокими градиентами определяющих физических величин. Под действием гравитационной силы растворенные в жидкости вещества распределяются неравномерно и формируют устойчивую стратификацию, задаваемую профилями концентрации примеси [1, 2]. Такая неравновесная среда характеризуется наличием ряда специфических движений жидкости, включая индуцированные диффузией течения на неподвижных непроницаемых

препятствиях, характеризующихся сложной ячеистой структурой течения [2–5], а также системы внутренних волн и тонкоструктурных прослоек, образующихся при движении препятствий в толщестратифицированной жидкости [6, 7].

Эффекты стратификации, которые активно изучаются теоретически и экспериментально, находят разнообразные приложения в гидроаэродинамике природных и промышленных систем. Научный интерес к данной проблеме обусловлен необходимостью изучения ряда явлений в окружающей среде, таких как интенсивные долинские или горные ветры в атмосфере и склоновые потоки в океане [2, 3], а также самодвижение объектов [8, 9]. Гравитационные (внутренние) волны являются важным элементом динамики морской среды и атмосферы, они переносят на большие расстояния энергию и импульс, интенсифицируют перенос вещества и влияют на безопасность полетов в атмосфере [6, 7].

В силу сложности такого типа задач для теоретического анализа одним из основных инструментов их решения становится численное моделирование. Современные вычислительные методы позволяют исследовать характеристики течения в полной нелинейной постановке с учетом всех диссипативных факторов и естественных переменных без введения дополнительных ограничений (приближений пограничного слоя либо подстилающей плоскости, необходимых для построения аналитических решений [6]), которые затрудняют выполнение количественных сравнений с данными эксперимента [10, 11].

Целью данной работы является развитие методики численного моделирования динамики и тонкой структуры течений стратифицированных жидкостей с учетом реальных свойств среды, геометрии течений и влияния внешних динамических факторов.

2. Математическая постановка задачи

В данной работе решается нестационарная плоская задача формирования течений непрерывно стратифицированных жидкостей около неподвижных и движущихся непроницаемых препятствия выбранной формы.

2.1 Система уравнений

В качестве базовой математической модели для изучаемых физических процессов выбрана система дифференциальных балансных уравнений механики неоднородных многокомпонентных жидкостей в приближении Буссинеска и пренебрежении эффектами сжимаемости, поскольку скорости изучаемых течений малы по сравнению со скоростью звука [1, 10]. Она включает в себя уравнение состояния $\rho(S(y))$, неразрывности Даламбера, баланса вещества Фика и импульса Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, & \rho &= \rho_{00} (\exp(-y/\Lambda) + s), \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s &= k_s \Delta s + \frac{v_y}{\Lambda}, & \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v} - s \mathbf{g}, \end{aligned} \quad (1)$$

где s – возмущение солености (стратифицирующей примеси), включающее коэффициент солевого сжатия, $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ – скорость жидкости, где ось $0y$ направлена вертикально вверх, P – давление за вычетом гидростатического, ν – коэффициент кинематической вязкости, k_s – коэффициент диффузии соли, t – время, \mathbf{g} – ускорение свободного падения, ∇ и Δ – операторы Гамильтона и Лапласа, $\Lambda = (d \ln \rho_0 / dy)^{-1}$ – длина, $N = \sqrt{g/\Lambda}$ – частота и $T_b = 2\pi/N$ – период плавучести.

2.2 Начальные и граничные условия

Постановка задачи предполагает, что в начальный момент времени $t = 0$ в покоящуюся непрерывно стратифицированную жидкость помещается непроницаемое препятствие, на поверхности которого задается условие прилипания для скорости и непротекания для вещества:

$$\mathbf{v}, s|_{t \leq 0} = 0, \quad v_{x,y}|_{\Sigma} = 0, \quad \mathbf{v}, s|_{x,y \rightarrow \infty} = 0, \quad \left. \frac{\partial S}{\partial n} \right|_{\Sigma} = -\frac{1}{\Lambda} \left. \frac{\partial y}{\partial n} + \frac{\partial s}{\partial n} \right|_{\Sigma} = 0, \quad (2)$$

где n – внешняя нормаль к поверхности препятствия Σ . На большом удалении от препятствия задаются условия затухания всех возмущений.

Система уравнений (1) с граничными условиями (2) описывают течения, индуцированные диффузией, которые характеризуются сложной многоуровневой системой циркуляционных движений жидкости, компенсирующих прерывание диффузионного потока стратифицирующей примеси на непроницаемом препятствии [5]. Установившееся поля физических переменных такого течения служат начальными условиями для задачи обтекания препятствия потоком непрерывно стратифицированной жидкости, когда на удалении от препятствия задается невозмущенный поток:

$$v_x|_{x,y \rightarrow \infty} = U, \quad v_y|_{x,y \rightarrow \infty} = 0.$$

2.3 Характерные масштабы задачи

Задача характеризуется набором размерных параметров ($\nu = 10^{-6}$ м²/с, $k_s = 1.41 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $g = 9.8$ м/с², $N = 0 \div 1.2$ с⁻¹), которые формируют характерные масштабы: времени $t = T_b$, длины – масштаб плавучести Λ ,

препятствия L , вязкий $\delta_N^v = \sqrt{\nu/N}$ и диффузионный $\delta_N^{k_s} = \sqrt{\kappa_s/N}$ масштабы, скорости $U_N^v = \sqrt{\nu N}$, $U_N^{k_s} = \sqrt{\kappa_s N}$.

Отношения масштабов задают традиционные безразмерные комплексы – шкалу плавучести $C = \Lambda/L$, числа Рейнольдса $Re = |\mathbf{v}|L/\nu$, Пекле $Pe = |\mathbf{v}|L/\kappa_s$, Шмидта $Sc = \nu/\kappa_s$ и Фруда $Fr = |\mathbf{v}|/NL$, где $|\mathbf{v}|$ – величина характерной скорости течения, которая при рассмотрении задачи течения, индуцированного диффузией на неподвижном препятствии, принимается равной $U_N^{k_s}$, а при решении задачи об обтекании препятствия – скорости потока U .

Существенные различия в значениях характерных масштабов длины указывают на сложность внутренней структуры стратифицированного течения, включающей как крупномасштабные элементы – волны и вихри, так и тонкоструктурные – высокоградиентные тонкие прослойки [10].

Основное достоинство рассмотренной постановки задачи в том, что она позволяет одновременно изучать все элементы течений в рамках единого описания в естественных физических переменных без привлечения дополнительных констант и связей.

3. Численное моделирование

Изначально поставленная задача решалась методом конечных разностей на основе программ собственной разработки на языке программирования Фортран с использованием персональных компьютеров [5]. Результаты расчетов показали достаточно хорошее совпадение с аналитическими и экспериментальными данными, однако дальнейшего развития данный подход не получил ввиду необходимости использования более точных численных методик и высокого пространственно-временного разрешения, что потребовало применения высокопроизводительных вычислительных систем.

Анализ коммерческих пакетов прикладных программ с закрытым исходным кодом показал, что в них на сегодняшний день нет готовых решений системы фундаментальных уравнений многокомпонентных жидкостей. Заметный прогресс в решении сложных задач механики сплошных сред обусловлен развитием открытых вычислительных технологий, которые позволили реализовать более точные методы построения решений и высокоразрешающие численные модели. Одним из наиболее перспективных свободно распространяемых пакетов является OpenFOAM с открытым исходным кодом [12]. Пакет представляет собой набор библиотек, утилит и решателей, предоставляющих инструменты для численного моделирования широкого ряда прикладных задач с возможностью распараллеливания вычислений.

3.1 Дискретизация расчетной области

Основными критериями для оценки параметров области решения и степени ее пространственной дискретизации являются макромасштабы Λ и L , на основе которых определяются размеры расчетной области, и микромасштабы δ_N^v и δ_N^{ks} м, задающие минимальные размеры ячеек расчетной сетки. Условия адекватного разрешения тонкоструктурных компонент течения предполагают уместение на минимальном микромасштабе нескольких ячеек расчетной сетки, главным образом, вблизи границ препятствия, где фиксируются наиболее высокие значения градиентов [13].

Проведенные тестовые расчеты с различными разрешениями расчетной сетки подтвердили необходимость удовлетворения указанному критерию выбора минимального размера ячейки. При проведении расчетов на достаточно грубой сетке вблизи препятствия фиксируются локальные нефизические осцилляции решения, которые при продолжительных вычислениях приводят к накоплению погрешности и остановке счета.

Дискретизация расчетной области осуществлялась с использованием утилит `blockMesh`, `topoSet` и `refineMesh` в открытом пакете `OpenFOAM`, а также в открытой интегрируемой платформе `SALOME`. Простота геометрии позволяет построить блочно-структурированную гексаэдральную расчетную сетку с совмещением линий на границах блоков. Процедура построения была параметризована, что позволило существенно сократить время перестройки сетки при изменении геометрических параметров расчетной области и препятствия.

Алгоритм разбиения расчетной области предполагает сгущение ячеек в направлении препятствия при условии сохранения соотношения размеров граней гексаэдров не более 2. Однако в этом случае необходимость измельчения сетки в одной подобласти течения влечет излишне мелкую сетку в других областях, где особой потребности в мелкой сетке нет, что приводит к нерациональному использованию вычислительных ресурсов.

С целью улучшения качества дискретизации расчетной области дополнительно использовались утилиты `topoSet` и `refineMesh`, позволяющие на основе геометрических либо параметрических признаков выделять подобласти расчетной сетки и локально измельчать их в соответствии с заданными масштабами и выбранными направлениями. В этом случае удается построить расчетную сетку с минимальным размером ячейки $2 \cdot 10^{-5}$ м вблизи непроницаемых границ препятствия, что удовлетворительно разрешает диффузионный микромасштаб δ_N^{ks} , при относительно небольшом общем количестве ячеек $4.4 \cdot 10^5$. В то же время при построении расчетной сетки первым упомянутым способом с таким же минимальным размером ячейки вблизи границ препятствия требуется более миллиона расчетных ячеек, что существенно увеличивает время расчета.

3.2 Численноерешение

Численное моделирование системы уравнений (1) с граничными условиями (2) проводится на базе пакета OpenFOAM, открытость исходного кода которого позволила построить собственный решатель stratifiedFoam, численно реализующий построенную математическую модель с использованием метода конечных объемов. Для учета эффектов стратификации и диффузии стандартный решатель isoFoam, реализующий нестационарные уравнения Навье-Стокса для случая однородной жидкости, был дополнен новыми переменными (плотность и возмущение солёности) и соответствующими уравнениями для их расчета, а также новыми вспомогательными параметрами (частота плавучести N , масштаб стратификации Λ , коэффициент диффузии k_s , ускорение свободного падения g др.). В уравнение Навье-Стокса для вертикальной компоненты скорости добавлены члены, учитывающие наличие стратифицирующей примеси, а в уравнение диффузии для возмущения солёности – дополнительные слагаемые, определяющие фоновую стратификацию.

Для интерполяции конвективных членов использовалась TVD схема (TotalVariationDiminishing) с ограничителем (limitedlineardifferencing), которая вносит минимальную численную диффузию и обеспечивает отсутствие осцилляций решения [14]. 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 (backwarddifferencing), которая обеспечивает хорошее разрешение физического процесса во времени.

При дискретизации граничных условий (2) наряду со стандартными утилитами и библиотеками пакета OpenFOAM использовались расширенные, входящие в группу swak4Foam. Граничное условие для возмущения солёности на непроницаемой поверхности препятствия реализовано с использованием библиотеки funkySetBoundaryField, которая позволяет задавать аналитические выражения для различных физических переменных в выбранных подобластях границы расчетного домена.

Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений применялись итерационные солверы PCG, использующие методы сопряженных градиентов с предобуславливанием для симметричных матриц, а для асимметричных матриц – метод бисопряженных градиентов PBiCG с предобуславливанием. В качестве предобуславливателя для симметричных матриц была выбрана процедура DIC, основанная на упрощенной схеме неполной факторизации Холецкого, а для асимметричных матриц использовался предобуславливатель DILU, основанный на упрощенной

неполной LU факторизации. Для связанного расчета поля скорости и давления использовался устойчивый, хорошо сходящийся алгоритм PISO, который показывает высокую эффективность при решении нестационарных задач.

3.3 Вычисления и обработка данных

Расчеты поставленных задач проводились в параллельном режиме с использованием ресурсов виртуальной вычислительной лаборатории UniHUB (www.unihub.ru)[15]. Технологическая платформа UniHUB ориентирована на повышение эффективности процессов разработки, внедрения и моделирования вычислительных задач и предоставляет прямой доступ на вычислительный сегмент кластера МСЦ РАН.

Проведение параллельных вычислений тестовой задачи обтекания горизонтальной пластины с достаточно высоким пространственным разрешением расчетной области показали существенную эффективность распараллеливания счета. Так, при вычислениях задачи на 8 ядрах расчет одной итерации занял около 37 сек, на 16 ядрах – 7 сек, а на 24 – 3 сек. С дальнейшим увеличением числа задействованных ядер скорость вычислений практически не меняется, т.е. в данном конкретном случае проведение расчетов на 24 ядрах кластерной системы является наиболее оптимальным.

Для проведения полного анализа структуры и динамики стратифицированных течений вычислялись дополнительные физические переменные: полная плотность, завихренность, скорость диссипации механической энергии, компоненты тензора вязких напряжений, темпа бароклинной генерации завихренности, распределения динамических характеристик и др. Для этих целей использовались стандартные утилиты пакета vorticity, stressComponents, wallGradU и др., а также расширенные библиотеки –funkySetFields и swakToroSources, позволяющие задавать аналитические выражения для искомых величин в определенных подобластях решения. Для преобразования цифровых данных в кодах OpenFOAM к другим форматам и для последующей обработки результатов расчетов в графических пакетах ParaView и Origin использовались стандартные утилиты sample, probesLocation и topoSet.

4. Результаты и обсуждение

В качестве иллюстрации работоспособности разработанного решателя пакета OpenFOAM в данной работе приводятся результаты расчета обтекания горизонтальной пластины конечной толщины потоком непрерывно стратифицированной жидкости и течений, индуцированных диффузией на непроницаемой клиновидном препятствии.

4.1 Горизонтальная пластина

Непроницаемое препятствие, погруженное в толщу непрерывно стратифицированной среды, прерывает диффузионный поток

стратифицирующего вещества и формирует сложную структуру компенсационных движений жидкости. Картина течения, индуцированного диффузией на горизонтальной пластине, состоит из многоуровневой последовательности симметрично расположенных циркуляционных ячеек(рис.1а), влияние которых распространяется далеко за пределы препятствия в виде протяженных слоистых структур[5].

С уменьшением величины стратификации среды наблюдается уширение течений наряду с падением интенсивности циркуляции жидкости в вихревых ячейках. В случае предельно слабых стратификаций скорость циркуляционного движения жидкости оказывается чрезвычайно малой, а в приближении однородной среды такой вид течений и вовсе отсутствует. Сравнения рассчитанных полей течения, индуцированного диффузией на непроницаемой горизонтальной пластине, с картинами теневой визуализации в лабораторных опытах показали хорошее согласие численных и экспериментальных данных [10, 11].

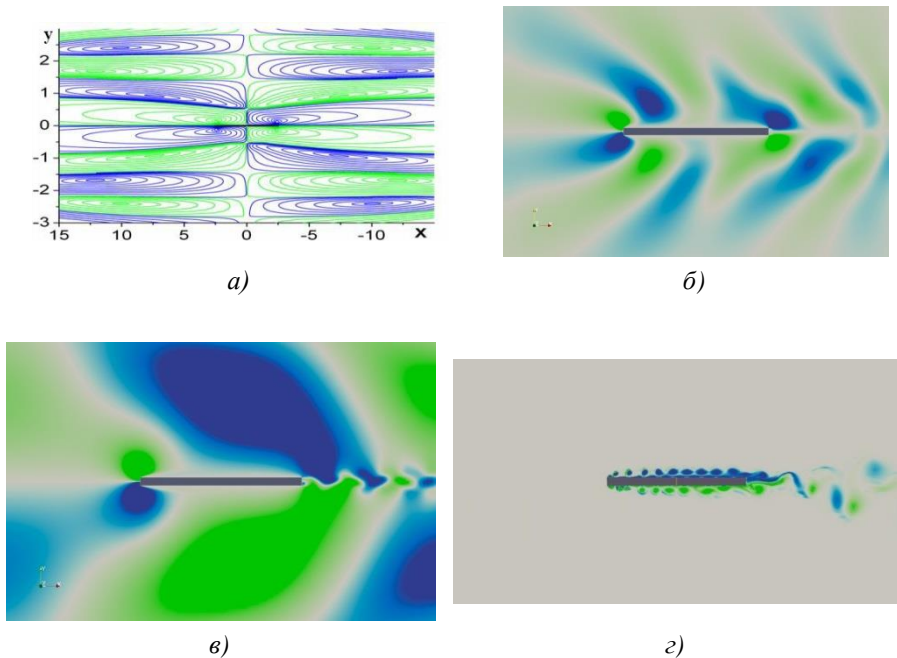


Рис.1. Структура стратифицированного течения($N=1.2c^{-1}$) около неподвижной (а – течение, индуцированное диффузией) и равномерно движущейся(б – $Re=10^3$ в $Re=5 \cdot 10^3$, в – $Re=8 \cdot 10^4$) горизонтальных пластин($L = 10$ см, $h = 0.5$ см).

С началом обтекания препятствия потоком стратифицированной жидкости картина течения кардинально меняется: начинают формироваться опережающие возмущения, поля присоединенных внутренних волн и спутный

след [6, 7, 16]. Различаются три основных режима течения стратифицированной жидкости около горизонтальной пластины при, соответственно, малых ($Re < 10^3$), умеренных ($Re < 2 \cdot 10^4$) и сравнительно больших ($Re < 10^5$) числах Рейнольдса, когда наиболее проявлены определенные структурные элементы течения: ярко выраженные опережающие возмущения и присоединенные внутренние волны (рис.1б); интенсивные внутренние волны, сосуществующие с зарождающимся спутным следом за препятствием (рис.1в); доминирующие вихревые структуры, порождаемые передними острыми кромками пластины, и интенсивный спутный вихревой след (рис.1г).

Сравнения рассчитанных картин стратифицированного течения около горизонтальной пластины дает хорошее согласие с экспериментальными теньевыми картинками, в которых отчетливо просматриваются все основные структурные элементы течений [7, 10, 11]. Рассмотрение различных видов жидкостей (сильно и слабо стратифицированные, потенциально и актуально однородные) при численном решении задачи обтекания препятствий обеспечивает дополнительные возможности независимого контроля точности вычислений наряду с традиционными, обеспечивающими дискретное выполнение законов сохранения с наперед заданной точностью.

4.2 Клиновидное препятствие

Большой интерес представляет изучение течений не только на полосе, но и препятствиях другой формы, особенно клиновидной. Экспериментальные исследования показали, что свободное клиновидное препятствие нейтральной плавучести, погруженное в непрерывно стратифицированную жидкость, совершает самодвижение со скоростью порядка сантиметра в час [8, 9].

Непроницаемое клиновидное препятствие блокирует фоновый диффузионный перенос и формирует сложную систему течений. Численное моделирование течений, индуцированных диффузией на клине, показало существование сложной многоуровневой системы циркуляционных ячеек, примыкающих к острым кромкам препятствия. В поле завихренности тонкий слой циклонической завихренности (против часовой стрелки), примыкает непосредственно к нижней грани клина (рис. 2). За ним следует совокупность чередующихся компенсационных областей с различными знаками. При этом интенсивность завихренности уменьшается в направлении от препятствия, а толщина слоя, наоборот, увеличивается. Распределение значений завихренности в верхней полуплоскости антисимметрично относительно горизонта нейтральной плавучести.

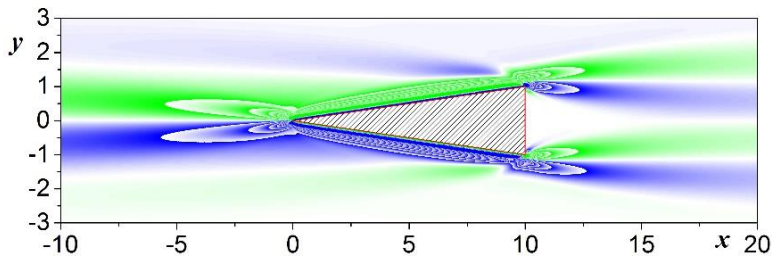


Рис. 2. Поле завихренности, индуцированного диффузией на клине длиной $L = 10$ см и высотой основания $h = 2$ см, $N = 1 \text{ с}^{-1}$.

Численные исследования показали, что сложная ячеистая структура течений, формирующихся около клина, сопровождается возникновением областей дефицита давления у его острой вершины, что объясняет возникновение пропульсивной силы, приводящей к самодвижению вдоль горизонта нейтральной плавучести. С целью детального изучения влияния формы препятствия на эффект самодвижения рассмотрены клинья с прямыми и искривленными гранями симметрично относительно продольной оси x . Научный и практический интерес представляет влияние на динамику и структуру стратифицированных течений радиуса и знака кривизны клиновидного препятствия (выпуклость и вогнутость).

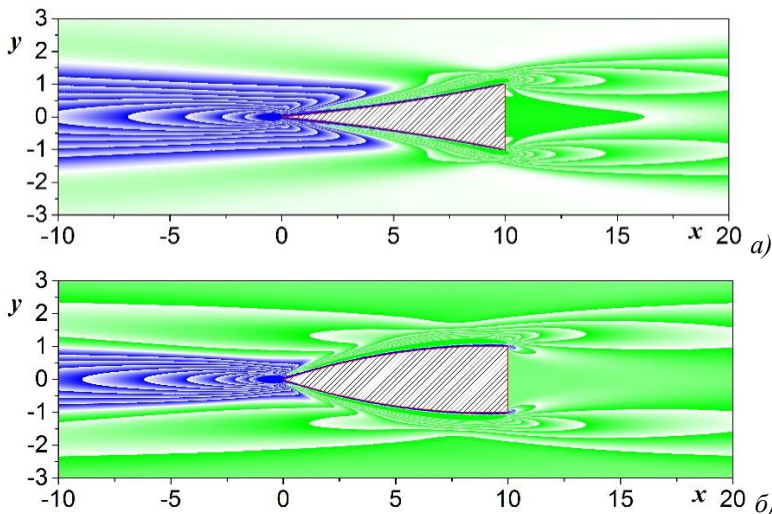


Рис. 3. Поле давления для клиновидного препятствия длиной $L = 10$ см и высотой основания $h = 2$ см с искривленными гранями: вогнутыми (а) и выпуклыми (б).

Результаты вычислений поля давления, представленные на рис. 3, показали, что размеры области дефицита давления у острой вершины клина зависят от

формы искривления боковых сторон. Зона отрицательного давления захватывает часть поверхности вблизи острой вершины клиновидного препятствия с вогнутыми гранями (рис. 3а) и простирается в горизонтальном направлении. При этом толщина этой зоны значительно больше, чем для выпуклого клина (рис. 3б).

5. Заключение

Предложена численная модель расчета течений непрерывно стратифицированной жидкости с учетом эффектов нелинейности и диффузии, реализованная методом конечных объемов в решателе собственной разработки открытого пакета OpenFOAM.

Отработана процедура построения качественной расчетной сетки, удовлетворяющей требованиям разрешения всех микромасштабов задачи в высокоградиентных областях течения.

Расчеты стратифицированных течений около пластины и клина, проведенные в параллельном режиме с использованием вычислительных ресурсов web-лаборатории UniHUB, показали высокую работоспособность предложенной численной модели и хорошее согласие с экспериментальными данными.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-37-50001). Авторы выражают глубокую благодарность зав. Лабораторией механики жидкостей ИПМех РАН, проф. Ю.Д. Чашечкину за конструктивные идеи и поддержку, а также сотрудникам ИСП РАН, предоставившим вычислительные ресурсы web-лаборатории UniHUB.

Список литературы

- [1]. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика, том VI, Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [2]. Л. Прандтль. Гидроаэромеханика. М.: ИИЛ, 1949 г. 488 с.
- [3]. O.M.Phillips. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. Deep-Sea Res., volume 17, 1970. P. 435–443.
- [4]. A. Shapiro, E. Fedorovich. A boundary-layer scaling for turbulent katabatic flow. Boundary-layer meteorology, volume 153, Issue 1, 2014. P. 1-17. doi: 10.1007/s10546-014-9933-3.
- [5]. Я.В. Загуменный, Ю.Д. Чашечкин. Тонкая структура нестационарного течения, индуцированного диффузией на неподвижной пластине. Известия РАН: Механика жидкости и газа, № 3, 2013 г. стр. 100-117.
- [6]. Ю.Д.Чашечкин, Р.Н.Бардаков, Я.В.Загуменный. Расчет и визуализация тонкой структуры полей двумерных присоединенных внутренних волн, Морской гидрофизический журнал, № 6. 2010 г. стр. 3-15.
- [7]. Я.В.Загуменный. Динамика и структура стратифицированного течения около горизонтальной пластины. Доклады НАН Украины, № 7, 2014 г. стр. 60-67.

- [8]. M. R.Allshouse, M.F.Barad, T.Peacock Propulsion generated by diffusion-driven flow. *Nature Physics*, volume 6, 2010. P. 516–519. doi: 10.1038/nphys1686
- [9]. M.J.Mercier, F.M.Ardekani, M.R.Allshouse, B.Doyle, T.Peacock. Self-propulsion of immersed object via natural convection. *Physical review letters*, volume 112, 2014. P. 204501(5).
- [10]. Ю.Д.Чашечкин. Дифференциальная механика жидкостей: наблюдения и расчеты структуры течений. *Журнал проблем эволюции открытых систем*, том 2, вып. 15, 2013 г. с. 20-36.
- [11]. Yu.D.Chashechkin, V.V.Mitkin. A visual study on flow pattern around the strip moving uniformly in a continuously stratified fluid, *J. Visualiz*, volume 7, Issue 2, 2004. P. 127-134.
- [12]. В.Т.Калугин, М.В.Крапошин, С.В.Стрижак, А.В.Юскин Возможности открытого пакета OpenFOAM для решения задач аэрогидромеханики и теплообмена. *Труды РНКТ-5*. М.: Изд. дом МЭИ, том 1, 2010 г. с. 85-88. [ISBN 978-5-383-00529-3](#)
- [13]. Ю.Д.Чашечкин, Я.В.Загуменный. Расчет течений непрерывно стратифицированной жидкости с использованием открытых вычислительных пакетов на базе технологической платформы UniHUB. *Труды Института системного программирования РАН*, том 24, 2013 г. стр. 87-106. doi: 10.15514/ISPRAS-2013-24-5.
- [14]. Д.В.Чирков, С.Г.Черный. Сравнение точности и сходимости некоторых TVD-схем. *Вычислительные технологии*, том 5, 2000 г. с. 86-107.
- [15]. О. Самоваров, С. Гайсарян. Архитектура и особенности реализации платформы UniHUB в модели облачных вычислений на базе открытого пакета OpenStack. *Труды Института системного программирования РАН*, том 26, вып. 1, 2014 г. стр. 403-420 doi: 10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-17.
- [16]. N.F.Dimitrieva, Ia.V. Zagumennyi. Calculations of admixture transport around a horizontal plate in a continuously stratified fluid. *Selected papers of international conference “Fluxes and structures in fluids”*. М.: MAKS Press, 2014. P. 61–68.

Numerical simulation of stratified flows using OpenFOAM package

¹*N.F. Dimitrieva <dimitrieva@list.ru>*

²*Ya.V. Zagumennyi <zagumennyi@gmail.com>*

²*IHMNASU, 03680, Ukraine, Kiev, 8/4 Zheliabova Street,*

¹*IPMech RAS, 119526, Russia, Moscow, 101/1 Vernadskogo Avenue.*

Abstract. The paper is devoted to construction of a numerical model and computations of continuously stratified fluid flows in field of external mass forces accounting for dissipative factors, viscosity and diffusion. Mathematical model is based on the fundamental set of differential equations of inhomogeneous multicomponent fluid mechanics. Solution of the problem is constructed numerically in the complete non-linear formulation using finite volume method in frame of the open source package OpenFOAM. To take in to account the stratification and diffusion effects a new own solver, stratifiedFoam, was developed and tested using the standard and extended libraries of the package. A particular attention is focused at construction of a high quality computational grid which satisfies basic requirements for resolution of all the microscales of the problem in high-gradient regions of the flow. The calculations performed in parallel regime on computational facilities of the web-laboratory UniHUB demonstrated a pretty high efficiency of the proposed numerical model and a good agreement with the experimental data.

Keywords: numerical simulation; open source computational packages; stratified flows.

References

- [1]. L.D. Landau, E.M. Lifshits. Teoreticheskaya fizika, tom VI Gidrodinamika [Theoretical physics, volume VI, Hydrodynamics]. M.: Nauka [Moscow: Science], 1986. 736 p. (in Russian)
- [2]. L. Prandtl. Gidroaeromekhanika [Hydroaeromechanics]. M.: Izdatel'stvo inostranoi literatury [Moscow: Foreign Literature Publishing House], 1949. 488 p. (in Russian)
- [3]. O.M. Phillips. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. Deep-Sea Res., volume 17, 1970. P. 435–443.
- [4]. A. Shapiro, E. Fedorovich. A boundary-layer scaling for turbulent katabatic flow. Boundary-layer meteorology, volume 153, Issue 1, 2014. P. 1–17. doi: 10.1007/s10546-014-9933-3.

- [5]. Ia.V.Zagumennyi, Yu.D.Chashechkin. Fine structure of unsteady diffusion-induced flow over a fixed plate. *Fluid Dynamics*, volume 48, № 3, 2013.P. 374-388. doi: 10.1134/S0015462813030113
- [6]. Yu.D.Chashechkin, R.N. Bardakov, Ia. V. Zagumennyi. Raschet i vizualizatsiya tonkoj struktury polej dvumernykh prisoedinennykh vnutrennikh voln [Calculation and visualization of the fine structure of fields of two-dimensional attached internal waves], *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal [MarineHydrophysicalJournal]*, № 6. 2010. P. 3-15 (inRussian).
- [7]. Ia. V. Zagumennyi. Dinamika i struktura stratifitsirovannogo techeniya okologorizonta'noj plastiny [Dynamics and structure of a stratified flow around a horizontal plate]. *Doklady NAN Ukrainy [Reports of NAS of Ukraine]*, № 7, 2014. P. 60-67 (in Russian).
- [8]. M. R.Allshouse, M.F.Barad, T. Peacock Propulsion generated by diffusion-driven flow. *Nature Physics*, volume 6, 2010. P. 516–519. doi: 10.1038/nphys1686
- [9]. M.J.Mercier, F.M.Ardekani, M.R.Allshouse, B.Doyle, T.Peacock. Self-propulsion of immersed object via natural convection. *Physical review letters*, volume 112, 2014. P. 204501(5).
- [10]. Yu.D.Chashechkin. Differentsial'naya mekhanika zhidkostej: nablyudeniya i raschety struktury techenij [Differential fluid mechanics: flow, structures observations and calculations] *ZHurnal problem ehvolyutsii otkrytykh sistem [Journal of the problems of the evolution of open systems]*, volume 2, Issue. 15, 2013. P. 20-36 (in Russian).
- [11]. Yu.D.Chashechkin, V.V.Mitkin. A visual study on flow pattern around the strip moving uniformly in a continuously stratified fluid, *J. Visualiz*, volume 7, Issue 2, 2004. P. 127-134.
- [12]. V. T. Kalugin, M. V. Kraposhin, S. V. Strizhak, A. V. Yuskin. *Vozmozhnosti otkrytogo paketa OpenFOAM dlya resheniya zadach aehro gidro mekhanikii teploobmena [The possibility of the opening package OpenFOAM to solve aero hydro mechanic and heat transfer problems]. Trudy RNKT-5 [Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Transfer]. M.:Izdatel'skij dom MEHI [Moscow: MPEI-publisher]*, volume 1, 2010. P. 85-88 (in Russian). [ISBN 978-5-383-00529-3](#)
- [13]. Yu.D.Chashechkin, Ia. V. Zagumennyi. Raschet techenij nepreryvno stratifitsirovnoj zhidkosti s ispol'zovaniem otkrytykh vychislitel'nykh paketov na baze tekhnologicheskoy platformy UniHUB [Calculation of continuously stratified fluid flows using open computational packages based on the technological platform UniHUB]. *Trudy ISP RAN [The Proceedings of ISP RAS]*, volume 24, 2013. P. 87-106 (in Russian). doi: 10.15514/ISPRAS-2013-24-5.
- [14]. D.V.Chirkov, S.G.Chernyi. Sravnenie tochnosti i skhodimosti nekotorykh TVD-skhem [Comparison of accuracy and convergence rate of some TVD-schemes] *Vychislitel'nye tekhnologii [Computer Applications]*, volume 5, 2000. P. 86-107 (in Russian).
- [15]. O. Samovarov, S. Gaysaryan. Arkhitektura i osobennosti realizatsii platformy UniHUB v modeli oblachnykh vychislenij na baze otkrytogo paketa OpenStack [The web-laboratory architecture based on the cloud and the UniHUB implementation as an extension of the OpenStack platform]. *Trudy ISP RAN [The Proceedings of ISP RAS]*, volume 26, issue 1, 2014. P. 403-420 (in Russian) doi: 10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-17.
- [16]. N.F. Dimitrieva, Ia.V. Zagumennyi. Calculations of admixture transport around a horizontal plate in a continuously stratified fluid. *Selected papers of international conference "Fluxes and structures in fluids". M.: MAKSPress, 2014. P. 61–68.*