

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

DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(1)-1

Для цитирования: Димитриева Н.Ф. Численное решение задачи обтекания клина потоком стратифицированной жидкости с использованием OpenFOAM. Труды ИСП РАН, том 29, вып. 1, 2017 г., стр. 7-20. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(1)-1

1. Введение

В настоящей работе изучаются механизмы формирования, развития, распада волновых и вихревых компонент течений в стратифицированной среде, где волны и вихри существуют одновременно и активно взаимодействуют между собой. Сложность подхода – внутренняя многомасштабность, отражающая присутствие крупных компонент течений (вихри, внутренние волны в толще жидкости) и тонких высокоградиентных прослоек, разделяющих структурно отличающиеся области течения [1].

Гравитационные (внутренние) волны являются важным элементом динамики морской среды и атмосферы, они переносят на большие расстояния энергию и импульс, интенсифицируют перенос вещества [2, 3]. Научный интерес к данной проблеме обусловлен необходимостью изучения ряда явлений в окружающей среде, таких как интенсивные долинные или горные ветры в атмосфере и склоновые потоки в океане [4, 5], а также самодвижение объектов [6].

Численными методами исследуется формирование тонкой структуры течений, которая влияет на перенос вещества, процессы разделения компонент течения и повышения локальной концентрации примесей. Одновременный расчет всех макро- и микрокомпонент течений в полной нелинейной постановке представляет собой сложную актуальную задачу, на сегодняшний день не решенную с практически необходимой степенью точности. Полученные результаты представляют важность для фундаментальной и прикладной аэро- и гидродинамики поскольку дают более глубокое понимание физических процессов в стратифицированных средах благодаря применению в численном моделировании фундаментальной системы уравнений механики неоднородных жидкостей, учитывающей влияние реальных свойств среды и внешних динамических факторов.

Целью работы является развитие методики численного моделирования течений непрерывно стратифицированных жидкостей с учетом геометрии препятствий, эффектов вязкости и диффузии.

2. Математическая модель

Решается нестационарная плоская задача обтекания горизонтального клина длиной $L = 10$ см и шириной $h = 2$ см потоком устойчиво стратифицированной жидкости с периодом плавучести $T_b = 6,28$ с.

Численное решение задачи обтекания клина потоком стратифицированной жидкости с использованием OpenFOAM

Н.Ф. Димитриева <dimitrieva@list.ru>
Институт гидромеханики НАНУ,
03680, Украина, г. Киев, ул. Желябова, д. 8/4

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования течений устойчиво стратифицированной жидкости на примере задачи обтекания клина в двумерной нестационарной постановке в широком диапазоне скоростей. Стратифицированные течения характеризуются широким диапазоном значений внутренних масштабов, отсутствующих в однородной жидкости. Все элементы течений (вихри, волны, тонкоструктурные прослойки) существуют одновременно и активно взаимодействуют между собой. Предложена система балансных уравнений, которая дает возможность одновременного изучения всех элементов течений в рамках единого описания в естественных физических переменных без привлечения дополнительных констант и связей. Поставленная задача решалась методом конечных объемов в открытом пакете OpenFOAM. Особое внимание уделялось созданию качественной высокоразрешающей расчетной сетки, которая учитывает многомасштабность поставленной задачи. Тестовые расчеты подтвердили необходимость разрешения минимальных диффузионных микромасштабов. Обсуждаются вопросы использования стандартных и расширенных утилит пакета OpenFOAM с целью реализации сложных граничных условий и разработки собственных решателей. В качестве начальных условий задачи обтекания клина внешним потоком стратифицированной среды использовались ранее рассчитанные поля течений, индуцированных прерыванием диффузионного переноса неподвижным клином, которые качественно согласуются с данными лабораторных опытов. Расчеты проводились в параллельном режиме с использованием сервисов платформы UniHUB. Единая система уравнений и общий алгоритм были использованы во всем диапазоне параметров задачи. Результаты расчетов показали сложную нестационарную структуру стратифицированных течений около клина. Определены механизмы формирования вихрей в областях больших градиентов возмущения солености в окрестности кромок препятствия. Во всех режимах течение характеризуется сложной внутренней структурой, в которой вначале выражены диссипативно-гравитационные волны, затем группа присоединенных волн, которые образуются в противофазе у кромок клина. Далее основным компонентом течения становятся вихри, которые начинают формироваться около передней кромки и становятся выраженными в следе. С увеличением скорости вся картина течения становится более нестационарной, подвижные вихри заполняют все поле вблизи тела и в следе за ним.

2.1 Система уравнений

В качестве математической модели изучаемых физических процессов выбрана фундаментальная система дифференциальных балансных уравнений механики неоднородных многокомпонентных жидкостей в приближении Буссинеска, когда малые изменения плотности на масштабах задачи учитываются только в членах с силой тяжести [1]:

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

Здесь $S = S_0(y) + s$ – полная соленость, s – ее возмущенная составляющая, ρ_{00} – плотность на нулевом уровне (горизонте нейтральной плавучести), $\rho(y)$ – невозмущенное распределение плотности, которое задается профилем солености $S_0(y)$, где ось y направлена вертикально вверх, \mathbf{v} – вектор скорости жидкости, P – давление за вычетом гидростатического, ν – коэффициент кинематической вязкости, κ_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 плавучести, $N = \sqrt{g/\Lambda}$ – частота плавучести.

2.2 Начальные и граничные условия

В качестве начального состояния стратифицированной среды рассматривается установившееся течение, индуцированное прерыванием диффузионного переноса неподвижным клином [7]. Такие течения характеризуются сложной ячеистой структурой и наличием высокоградиентных областей, визуализируемых в виде протяженных горизонтальных прослоек (рис.1).

Важную роль играют краевые эффекты, где схождение с острых кромок клиновидного тела тонких струйных течений жидкости, формирующихся вдоль каждой из его сторон, порождает внутренние волны [8]. Обычно тонкоструктурные эффекты вносят небольшие поправки в значения характеристик течений, но их действие усиливается большой величиной градиентов солености, поля которых отражают сложную периодическую структуру течений, индуцированных диффузией (рис. 1, а). Горизонтальные полосчатые структуры качественно согласуются с экспериментальными картинками визуализации (“цветной теневой метод” с горизонтальной щелью и решеткой) распределения градиента коэффициента преломления в лабораторном бассейне ИПМех РАН (рис. 1, б).

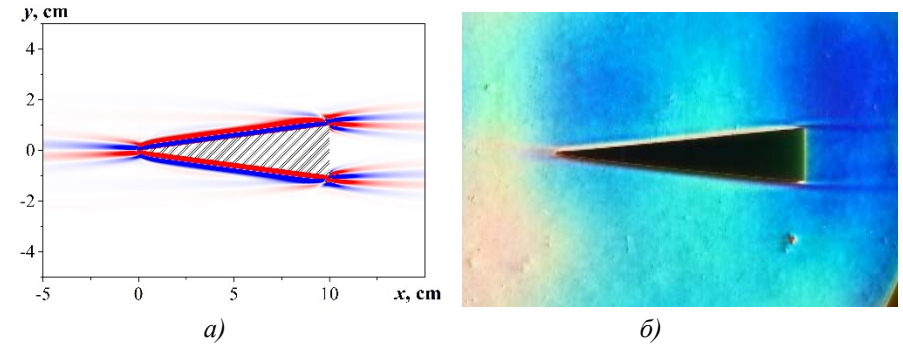


Рис. 1. Рассчитанная (а) и теневая (б) картины течения, индуцированного диффузией на клине

Fig. 1. Calculated (a) and experimental (c) pattern of flows induced by diffusion on a wedge

Физически обоснованные граничные условия для задачи обтекания горизонтальной пластины потоком непрерывно стратифицированной жидкости имеют следующий вид:

$$\mathbf{v}|_{\Sigma} = 0, \quad v_x|_{x,y \rightarrow \infty} = U, \quad v_y|_{x,y \rightarrow \infty} = 0, \quad s|_{x,y \rightarrow \infty} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n}|_{\Sigma} = -\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial y}{\partial n} + \frac{\partial s}{\partial n}|_{\Sigma} = 0. \quad (2)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности препятствия Σ . На большом удалении от препятствия задаются условия затухания всех возмущений, U – скорость внешнего обтекания препятствия.

Адекватность выбранной математической модели подтверждается соответствием основополагающим принципам механики и согласованностью независимых аналитических, численных и экспериментальных исследований стратифицированных течений около пластины и полуплоскости [1, 2].

2.3 Характерные масштабы

Задача характеризуется набором размерных параметров: $\nu = 10^{-6}$ м²/с, $\kappa_s = 1.41 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $g = 9.8$ м/с², $N = 1$ с⁻¹. Они формируют характерные масштабы: времени $t = T_b$, скорости – $U_N^v = \sqrt{\nu N}$, $U_N^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s N}$, U , а также длины. Большие линейные масштабы характеризуют исходную стратификацию (длину плавучести Λ) и геометрию течения (размеры препятствия L и h). Скорость источника U задает длину гравитационных поверхностных $\lambda_s = 2\pi U^2/g$ и внутренних $\lambda_i = U T_b$ гравитационных волн. Микромасштабы диссипативной природы (вязкий $\delta_N^v = \sqrt{\nu/N}$ и диффузионный $\delta_N^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s/N}$ микромасштабы) определяют поперечные размеры тонкоструктурных

компонентов. Компоненты структур с масштабами Прандтля $\delta_U^v = \nu/U$ и $\delta_U^{\kappa_s} = \kappa_s/U$ выражены в струях и следах.

Широкий диапазон значений масштабов длины указывает на сложность внутренней структуры стратифицированного течения, которую необходимо учитывать при разработке численной модели. Анализ линеаризованных фундаментальных уравнений и результаты лабораторного моделирования показывают, что крупномасштабные элементы течений (волны и вихри) характеризуют регулярно возмущенные компоненты полного решения [9]. Обширное семейство сингулярно возмущенных компонент описывает тонкоструктурные элементы течений, которые проявляются во всем диапазоне параметров изучаемых процессов. Все компоненты активно взаимодействуют между собой, формируя эволюционирующую тонкую структуру, которая влияет на перенос вещества, процессы разделения компонент течений.

Рассмотренная постановка задачи позволяет одновременный расчет всех элементов течений в рамках единого описания в естественных физических переменных без привлечения дополнительных констант и связей. Макромасштабы характеризуют размер области решения задачи, которая должна содержать все изучаемые компоненты течения, а микромасштабы – пространственное разрешение расчетной сетки.

3. Численная модель

Численное решение поставленной задачи было реализовано в свободно распространяемом пакете OpenFOAM, открытость исходного кода которого позволила построить оригинальный решатель, реализующий систему уравнений (1) методом конечных объемов. Для учета эффектов стратификации и диффузии стандартный решатель пакета isoFOAM был дополнен новыми переменными (ρ и s) и соответствующими уравнениями, а также новыми вспомогательными параметрами (Λ , κ_s , N , \mathbf{g} и др.) [10]. Граничное условие возмущения солёности s на поверхности клина реализовано с использованием утилиты funkySetBoundaryField, которая позволяет задавать аналитические выражения в выбранных подобластях границы расчетного домена.

Интерполяция конвективных членов проводилась по TVD схеме (Total Variation Diminishing), которая вносит минимальную численную диффузию и обеспечивает отсутствие осцилляций решения [11]. Для дискретизации производной по времени прибегали к неявной трехточечной несимметричной схеме второго порядка с разностями назад (backward differencing).

Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений применялись итерационные методы сопряженных градиентов с предобуславливателем PCG для симметричных матриц, а для асимметричных матриц — метод бисопряженных градиентов с предобуславливателем PBiCG. В качестве предобуславливателя для симметричных матриц была выбрана

процедура DIC, базирующаяся на упрощенной схеме неполной факторизации Холецкого. Для асимметричных матриц, соответственно, запускался предобуславливатель DILU. Для связанного расчета полей скорости и давления использовался устойчивый, хорошо сходящийся алгоритм PISO, который показал высокую эффективность в нестационарных задачах.

Дискретизация расчетной области осуществлялась с использованием утилит blockMesh пакета OpenFOAM. Геометрия изучаемого тела позволила построить блочно-структурированную гексаэдральную расчетную сетку с совмещением линий на границах блоков. Область решения задачи предложено разделить на семь блоков, как показано на рис. 2.

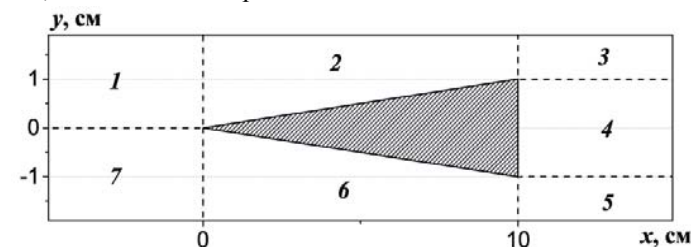


Рис. 2. Схема разбиения расчетной области на блоки

Fig. 2. Partition scheme of the computational domain

Тестовые расчеты с различным измельчением расчетной сетки подтвердили необходимость разрешения наименьших микромасштабов задачи δ_N^v и $\delta_N^{\kappa_s}$ [12]. На рис. 3 приведены зависимости от времени давления вблизи экстремальной вершины клина, где наиболее отчетливо проявляются тонкоструктурные компоненты индуцированных диффузией течений.

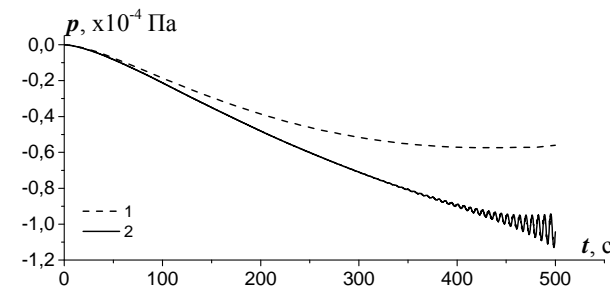


Рис. 3. Эволюция во времени давления в контрольной точке с координатами (0,101;0,011): 1 – сетка с минимальным размером ячейки $0,5 \cdot 10^{-4}$ м в окрестности контрольной точки, 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$ м

Fig. 3. Evolution of the pressure at the control point with coordinates (0,101;0,011): 1 – grid with a minimum size of the cell $0,5 \cdot 10^{-4}$ m near the control point, 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$ m

Решение является неустойчивым на грубой сетке 2 с общим количеством ячеек $0,5 \cdot 10^6$ ячеек при минимальном размере в окрестности контрольной точки около $1,5 \cdot 10^{-4}$ м. Для сравнения сетка 1 с минимальным размером ячейки $0,5 \cdot 10^{-4}$ м имеет 10^6 ячеек.

Алгоритм разбиения расчетной области предполагает сгущение ячеек в направлении препятствия при условии сохранения соотношения размеров граней гексаэдров не более 2, как показано на рис. 4,а. Вблизи обтекаемого тела соотношение размеров гексаэдров приблизительно равнялось единице, что положительно влияет на сходимость решения. Однако в этом случае необходимость измельчения сетки в одной подобласти течения влечет излишнее мелкую сетку в других областях, где особой потребности в мелкой сетке нет, что приводит к нерациональному использованию вычислительных ресурсов.

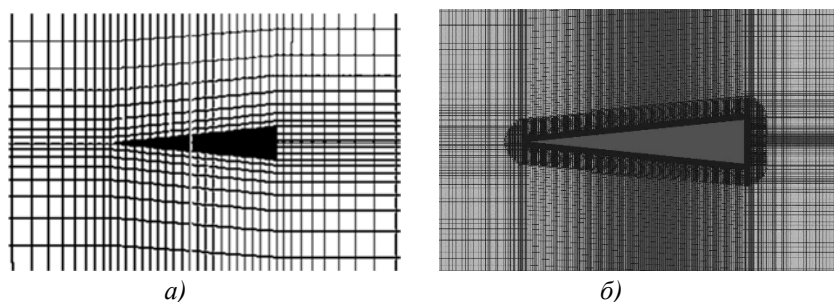


Рис. 4. Схема разбиения расчетной области с линейным сгущением (а) и с дополнительным локальным разбиением (б)

Fig. 4. Partition scheme of the computational domain linear condensation (a) and additional local partition (b)

С целью улучшения качества дискретизации области решения задачи 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 (рис. 4,б). Минимальный размер ячейки $0,2 \cdot 10^{-4}$ м вблизи непроницаемых границ удовлетворительно разрешает диффузионный микромасштаб δ_N^{ks} при относительно небольшом общем количестве ячеек сетки, равном $0,44 \cdot 10^6$.

Вместе с тем уменьшение пространственного разбиения, даже на небольшом участке расчетной области, требует соответственного уменьшения шага по времени, что увеличивает время расчета. Существенным недостатком поэтапного разбиения сетки является резкое изменение размера ячейки на границе заданной области, что может отразиться на результатах вычислений.

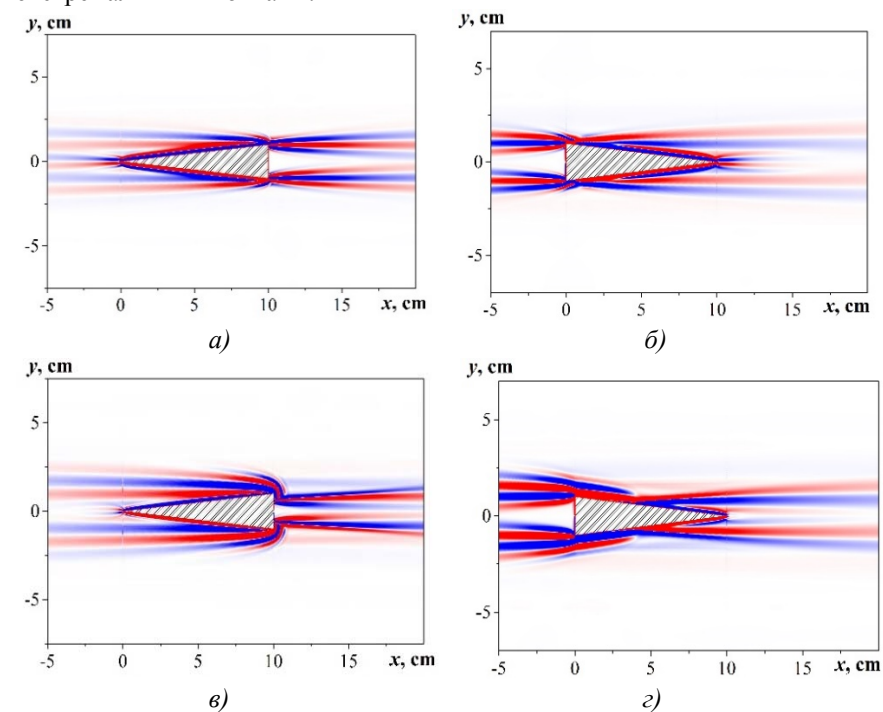
Вычисления проводились в параллельном режиме с привлечением сервисов платформы UniHUB. Проведение тестовых параллельных вычислений с

достаточно высоким пространственным разрешением расчетной области показали эффективность распараллеливания счета даже в двумерном случае. Так, на 8 ядрах расчет одной итерации по времени 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, поэтому в данном конкретном случае проведение расчетов на 24 ядрах кластерной системы является наиболее оптимальным.

4. Результаты и обсуждение

В рамках настоящей работы были проведены расчеты обтекания клина потоком стратифицированной жидкости в диапазоне скоростей $U = 10^{-5} \div 10^{-1}$ м/с.

Сложную многомасштабную структуру стратифицированных течений иллюстрирует поле горизонтальной компоненты градиента возмущения солености (рис. 5). В толще непрерывно стратифицированной жидкости формируются опережающие возмущения, розетки нестационарных и поля присоединенных внутренних волн, а также протяженный след за экстремальными точками.



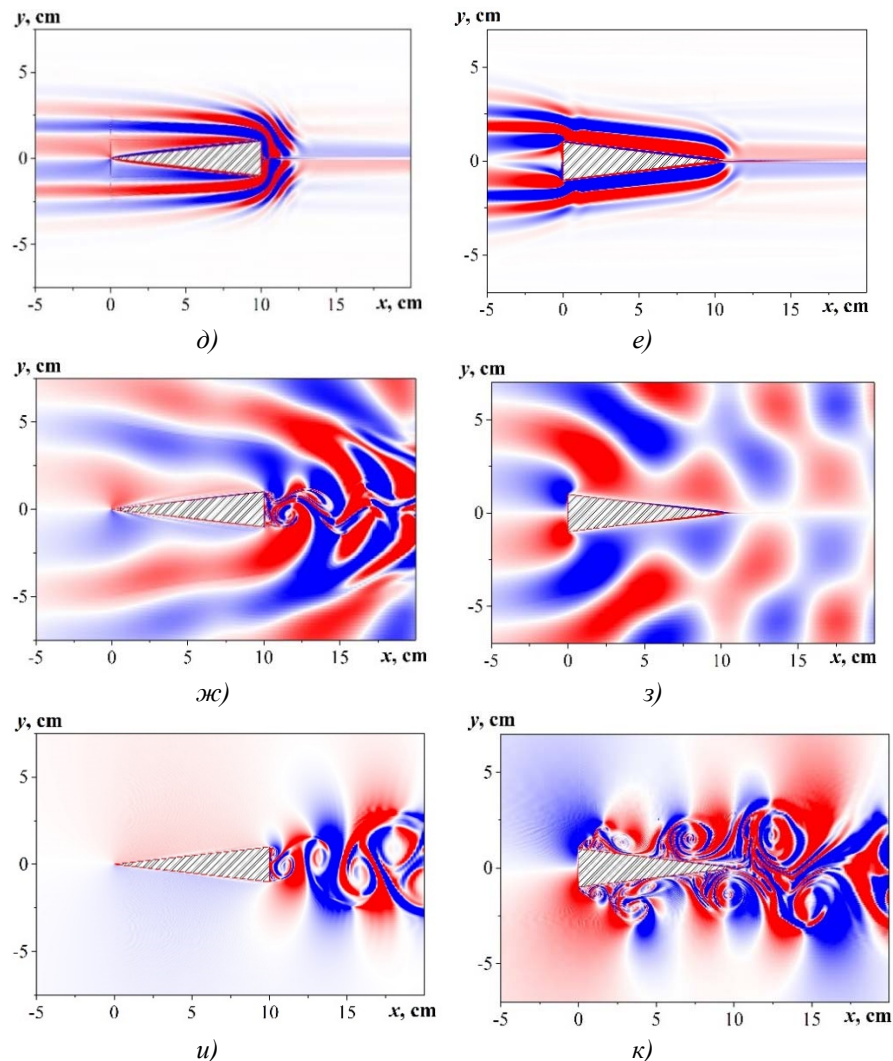


Рис. 5. Горизонтальная компонента градиента возмущения солености $\partial s/\partial x$ при обтекании клина со скоростью $U = 10^{-5}$ м/с (а, б), $U = 10^{-4}$ м/с (в, г), $U = 10^{-3}$ м/с (д, е), $U = 10^{-2}$ м/с (ж, з), $U = 10^{-1}$ м/с (и, к). ($L = 10$ см, $h = 2$ см, $T_b = 6.28$ с, красный цвет – положительные значения, синий – отрицательные)

Fig. 5. Horizontal component of salinity gradient perturbations $\partial s/\partial x$ with increase of the external flow velocity: $U = 10^{-5}$ m/s (a, б), $U = 10^{-4}$ m/s (в, г), $U = 10^{-3}$ m/s (д, е), $U = 10^{-2}$ m/s (ж, з), $U = 10^{-1}$ m/s (и, к). ($L = 10$ cm, $h = 2$ cm, $T_b = 6.28$ s, red - positive values, blue – negative ones)

Принципиальное различие картины обтекания тела стратифицированной жидкостью от однородной проявляется вблизи экстремальных точек обтекаемого тела. Когда скорость внешнего потока сравнима по порядку величины с характерной скоростью диффузии индуцированных потоков $U_N^{K_s}$, в течение длительного времени структура течения сохраняет элементы исходного поля (рис. 5, а, б). Возле острых углов проявляются системы периодических структур, иллюстрирующие внутренние волны. Источником внутренних волн служат краевые сингулярности, генерирующие интенсивное вертикальное вытеснение жидкости, что приводит к отклонению от изначального положения нейтральной плавучести и, как следствие, формированию периодических затухающих колебаний жидкости.

Увеличение скорости движения приводит к пропорциональному увеличению длины присоединенной внутренней волны в соответствии с формулой линейной теории $\lambda = UT_b$. Фазовые поверхности, разделяющие волновые возмущения противоположных знаков, загибаются в сторону движения пластины. При скоростях движения $U > 10^{-2}$ м/с в следе за клином формируются вихревые возмущения (рис. 5, ж-к). На границах раздела внутренних присоединенных волн и вихревого следа формируются высокоградиентные области. Рассчитанные картины обтекания клина по своей структуре согласуются с результатами экспериментальных и численных исследований обтекания тел с другими геометрическими формами потоком стратифицированной жидкости [1].

Выявлены существенные различия внутренней структуры полей различных физических величин, которые говорят о сложности изучаемого явления и высокой размерности пространства поставленной задачи. Структурные элементы полей физических величин отличаются друг от друга размерами и законами изменения по пространству и по времени. Причем градиенты физических величин, формирующиеся неоднородностями молекулярного потока стратифицирующей примеси, ведут себя немонотонно вблизи обтекаемого тела и достигают высоких численных значений.

6. Заключение

- Вычисления, проведенные в открытом пакете OpenFOAM показали возможность расчета многомасштабных структурированных течений в широком диапазоне параметров задачи.
- Проанализированы нестационарные стратифицированные течения около клина. Определены механизмы формирования вихрей в областях больших градиентов плотности в окрестности кромок препятствия.
- Результаты расчетов качественно согласуются с данными лабораторных опытов.

Работа выполнена с использованием сервисов платформы UniHUB – <http://www.unihub.ru>

Список литературы

- [1]. Чашечкин Ю. Д. Структура и динамика природных течений: теоретическое и лабораторное моделирование. В сб.: Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН. Под ред. Ф. Л. Черноусько. М.: Наука, 2015. С. 63-78. ISBN: 978-5-02-039181-9
- [2]. Чашечкин Ю.Д., Бардаков Р.Н., Загуменный Я.В. Расчет и визуализация тонкой структуры полей двумерных присоединенных внутренних волн, Морской гидрофизический журнал, № 6. 2010 г. стр. 3-15.
- [3]. Брузе К., Доксуа Т., Ерманик Е., Жубо С., Крапошин М., Сибгатуллин И. Прямое численное моделирование аттракторов внутренних волн стратифицированной жидкости в трапециевидной области с колеблющейся вертикальной стенкой. Труды ИСП РАН, том 26, вып. 5, 2014 г., с. 117-141. DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(5)-6
- [4]. Phillips O. M. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. Deep-Sea Res., volume 17, 1970. P. 435–443.
- [5]. Shapiro A., Fedorovich E. 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.
- [6]. Mercier M. J., Ardekani F. M., Allshouse M. R., Doyle B., Peacock T. Self-propulsion of immersed object via natural convection. Physical review letters, volume 112, 2014. P. 204501(5). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.204501>
- [7]. Dimitrieva N. F., Zagumennyi I. V. Diffusion-driven flows on a wedge-shaped obstacle. Physica Scripta, vol. 91, no 8, 2016, P. 084002. DOI: 10.1088/0031-8949/91/8/084002
- [8]. Димитриева Н. Ф., Чашечкин Ю. Д. Структура индуцированных диффузией течений на клине с искривленными гранями // Морской гидрофизический журнал, № 3, 2016 г. стр. 77–86. Доступно по ссылке: <http://mgfj.ph/index.php/repository?id=120>
- [9]. Байдулов В. Г., Чашечкин Ю. Д. Сравнительный анализ симметрий моделей механики неоднородных жидкостей. Доклады Академии Наук, том 444, № 1, 2012 г. стр. 38–41. DOI: 10.1134/S1028335812050011
- [10]. Димитриева Н. Ф., Чашечкин Ю. Д. Высокопроизводительное численное моделирование стратифицированных течений около клина в OpenFOAM. Труды ИСП РАН, том 28, вып. 1, 2016 г., с. 207-220. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-12
- [11]. Евстегнеев Н. М. Конечно-объемная TVD схема для решения 2D эволюционных уравнений мелкой воды. Вычислительные методы и программирование, том 7, № 1, 2006 г., с. 108-112. Доступно по ссылке: http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2006/pdf/v7r113.pdf
- [12]. Димитриева Н.Ф., Чашечкин Ю.Д. Численное моделирование динамики и структуры индуцированного диффузией течения на клине. Вычислительная механика сплошных сред, том 8, № 1, 2015 г. стр. 102– 110. doi: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.9

The numerical solution of the problem of stratified fluid flow around a wedge using OpenFOAM

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

Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
8/4 Zheliabova Street, Kiev, 03680, Ukraine

Abstract. Based on the open source software 2D numerical simulations of incompressible stratified fluids flows have been performed. They are characterized by a wide range of values of internal scales that are not in a homogeneous liquid. Mathematical model is based on the fundamental set of differential equations of inhomogeneous multicomponent fluid mechanics. The problem is solved using the finite volume method in an open source package OpenFOAM. The method allows analyzing in a single formulation the dynamics and fine structure of flow patterns past obstacles in a wide range of flow parameters. 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 were performed in parallel regime on computational facilities of the web-laboratory UniHUB (www.unihub.ru). The same system of equations and a general numerical algorithm were used for the whole range of the parameters under consideration. The calculation results are in a qualitative agreement with the data from laboratory experiments. Transient flow patterns past obstacles are analyzed, and physical mechanisms are determined, which are responsible for formation of vortices in regions with high density gradients near the edges of an obstacle. For all the velocities of the body motion, the flow field is characterized by a complicated internal structure. In the flow pattern around motionless body dissipative gravity waves are manifested at the edges of the strip. Around the slowly moving body a group of attached waves, are formed in opposite phases at the edges of the wedge. Then, the main flow components become vortices, which are formed around the edge of the wedge and manifested downstream in the wake. With further increase in velocity of the body motion, the flow pattern becomes more non-stationary.

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

DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(1)-1

For citation: Dimitrieva N.F. The numerical solution of the problem of stratified fluid flow around a wedge using OpenFOAM. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 29, issue 1, 2017, pp. 7-20 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(1)-1

References

- [1]. Chashechkin Yu. D. Structure and dynamics of natural flows: theoretical and laboratory simulation. In Proc.: Aktual'nye problemy mekhaniki. 50 let Institutu problem mekhaniki im. A. Ju. Ishlinskogo RAN [Actual Problems in Mechanics. 50 Years of the A. Yu. Ishlinskiy Institute for Problems in Mechanics of the RAS]. Ed. F. L. Chernousko. Moscow: Nauka [Science], 2015, pp. 63-78. ISBN: 978-5-02-039181-9
- [2]. Chashechkin Yu. D., Bardakov R. N., Zagumennyi I. V. Calculation and visualization of the fine structure of fields of two-dimensional attached internal waves. *Physical Oceanography*, 2010, no. 6, pp. 3-15. (in Russian)

- [3]. Brouzet C., Dauxois T., Ermanyuk E., Joubaud S., Kraposhin M., Sibgatullin I. Direct numerical simulation of internal gravity wave attractor in trapezoidal domain with oscillating vertical wall. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, 2016, vol. 28, issue 1, pp. 117-141 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(5)-6
- [4]. Phillips O. M. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. *Deep-Sea Res.*, 1970, vol. 17, pp. 435–443.
- [5]. Shapiro A., Fedorovich E. A boundary-layer scaling for turbulent katabatic flow. *Boundary-layer meteorology*, 2014, vol. 153, issue 1, pp. 1-17. DOI: 10.1007/s10546-014-9933-3.
- [6]. Mercier M. J., Ardekani F. M., Allshouse M. R., Doyle B., Peacock T. Self-propulsion of immersed object via natural convection. *Physical Review Letters*, 2014, vol. 112, pp. 204501(5). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.204501>
- [7]. Dimitrieva N. F., Zagumennyi Ia. V. Diffusion-driven flows on a wedge-shaped obstacle. *Physica Scripta*, vol. 91, no 8, 2016, pp. 084002. DOI: 10.1088/0031-8949/91/8/084002
- [8]. Dimitrieva N.F., Chashechkin Yu.D. The structure of induced diffusion flows on a wedge with curved edges. *Physical Oceanography*, 2016, no 3, pp. 77–86. Available at: <http://mgrj.ph/index.php/repository?id=120>
- [9]. Baydulov V.G., Chashechkin Yu.D. Comparative analysis of symmetries for the models of mechanics of nonuniform fluids. *Doklady Physics*, 2012, vol. 57, no. 5, pp. 192–196. doi: 10.1134/S1028335812050011
- [10]. Dimitrieva N.F., Chashechkin Yu.D. High-performance numerical simulation of stratified flows around a wedge in OpenFOAM. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, 2016, vol. 28, issue 1, pp. 207-220 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-12
- [11]. Evstigneev N.M. A finite-volume TVD Riemann solver for the 2D shallow water equations. *Vychislitel'nye Metody i Programirovanie [Numerical Methods and Programming]*, 2006, vol. 7, no 1, pp. 108-112. Available at: http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2006/pdf/v7r113.pdf
- [12]. Dimitrieva N.F., Chashechkin Yu.D. Numerical simulation of the dynamics and structure of a diffusion-driven flow on a wedge. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational continuum mechanics]*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 102– 110. (in Russian) doi: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.9