

УДК _____

Моделирование конвективных течений в CFD-пакетах

А.В. Евграфова², Д.Ф. Ибраев¹, А.Н. Сухановский²

¹Пермский государственный университет, Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1

Проведено численное исследование формирования конвективных течений в цилиндрическом слое жидкости с локализованным нагревом в центральной части. Для численной реализации задачи использовался конечно-элементный программный комплекс ANSYS. Расчеты проводились двумя различными методами, реализованными в CFD-пакетах CFX и FLUENT. Получены интегральные характеристики, характеризующие временную эволюцию течений. Проведено сравнение решений, полученных различными решателями, с экспериментально полученными данными.

Ключевые слова: конвекция, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT

Введение

Конвективные движения являются неотъемлемыми элементами многих природных процессов, наблюдаемых в атмосфере и океанах Земли, а также течений, реализуемых в различных технологических устройствах. Это определяет большой интерес к экспериментальному и численному изучению конвективных процессов.

Основная причина возникновения крупномасштабных атмосферных течений – это наличие горизонтальных градиентов температуры вследствие неоднородного нагрева поверхности Земли солнечным излучением. Конвективная природа крупномасштабных атмосферных течений позволяет исследовать различные особенности формирования подобных течений в лабораторных условиях: экспериментально и численно [1, 2].

Однако изучение формирования подобных течений в эксперименте требуют больших временных и материальных затрат. В отличие от эксперимента, численный подход дает возможность варьировать ряд важных параметров задачи, существенно влияющих на формирование и поведение конвективных течений, а также дает наиболее полную информацию о всех величинах, характеризующих течения.

1. Постановка задачи

Рассматривается цилиндр, наполненный жидкостью (рис. 1). Полагается, что на верхней границе

выполняется условие проскальзывания, на боковой стенке и на дне — условие прилипания.

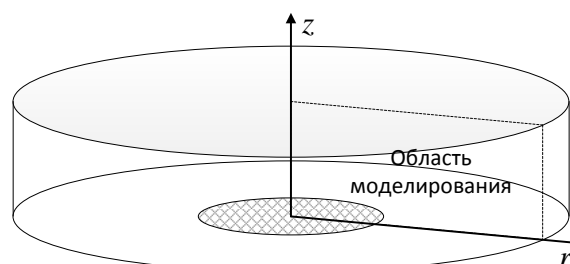


Рис. 1. Цилиндрической слой жидкости

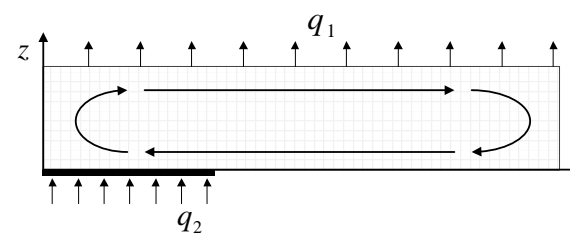


Рис. 2. Схематичное изображение расчетной области

Схематично исследуемая модель и циркуляция жидкости представлены на рисунке 2.

В центральной части цилиндр нагревается за счет постоянного теплового потока q_2 ; область нагрева показана на схеме черным прямоугольником. Отвод тепла осуществляется через свободную верхнюю границу, на которой, кроме проскальзывания, также задается постоянный поток тепла q_1

(отрицательный). Количество вводимого в слой тепла задается равным количеству тепла, отводимому с верхней границы.

Исследуемая задача решается в осесимметричной постановке (не учитывается зависимость от азимутальной координаты), течение жидкости предполагается ламинарным и описывается системой управляющих уравнений в размерной формулировке, включающей:

– уравнение сохранения полной энергии

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_{M, buoy} + S_E; \quad (1)$$

– уравнение количества движения в приближении Буссинеска [3]

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla p + \nabla \cdot \tau + S_{M, buoy}; \quad (2)$$

– уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

– граничные условия.

Полагается, что на боковых стенках и дне выполняется условие прилипания

$$U_{wall} = 0, \quad (4)$$

На верхней границе – условие проскальзывания:

$$U_{n, wall} = 0, \quad \tau_w = 0. \quad (5)$$

На верхней границе и в области нагрева также задаются потоки тепла:

$$q_{surf} = q_1, \quad q_{heat} = q_2. \quad (6)$$

В уравнениях (1–6) используются обозначения: $h_{tot} = h_{stat} + U^2 / 2$ – полная энтальпия; r – радиус-вектор; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность жидкости; p – давление; U – вектор скорости; T – температура; τ – тензор вязких напряжений; $S_{M, buoy} = \rho_{ref} \beta (T - T_{ref}) g$ – источник импульса, образованный силами плавучести; β – коэффициент объемного расширения; ρ_{ref} , T_{ref} – заданные значения плотности и температуры; g – вектор гравитационного ускорения; S_E – источник энергии.

2. Метод решения

Для численной реализации задачи в описанной постановке использовался конечно-элементный программный комплекс для моделирования течений жидкостей и газов ANSYS CFD. Технология ANSYS CFD открывает доступ к про-

граммным продуктам: ANSYS FLUENT и ANSYS CFX, с помощью которых мы проведем расчеты.

Решатель ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки), схожую с теми, что используется в анализе прочности, для дискретизации области. В отличие от ANSYS CFX, решатель ANSYS FLUENT использует сетку конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек). В итоге оба подхода формируют уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока, что является необходимым условием для точных решений задач гидрогазодинамики.

Принятые допущения об осевой симметрии задачи и ламинарном характере течения позволили значительно сократить количество расчетных узлов и время вычислений. Пространственное разрешение в расчетах составляло 1 мм. Тестирование показало, что дальнейшее сгущение расчетной сетки не влияет на результаты.

3. Результаты

Были проведены расчеты для модели цилиндрического слоя жидкости с локализованным нагревом в центре. Радиус модели составляет 150 мм, толщина слоя – 30 мм, радиус нагреваемой области – 50 мм.

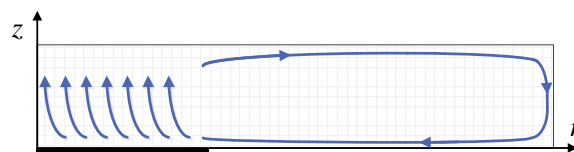


Рис. 3. Схематичное изображение конвективного движения

В случае подогрева жидкости в центре модели, устанавливается режим течения, схематически изображенный на рис. 3. Локальный нагрев в центральной части дна создает вертикальный и горизонтальный градиенты температуры. Горизонтальный градиент температуры приводит к образованию обратной меридиональной ячейки [2]. Течение в нижней части направлено к центру, а над центральной частью формируется интенсивное подъемное течение. В верхней части слоя радиальное движение направлено к периферии. Таким образом, происходит формирование адвективного течения.

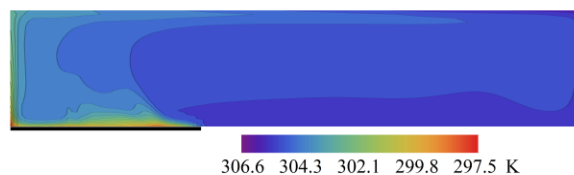


Рис. 4. Поле средней температуры течения в радиальном сечении (область нагрева показана черной линией)

На фоне основного течения, который занимает весь слой, возникают вторичные движения в виде конвективных струй, которые уносятся основным потоком (Рис. 5). Они образуются около нагретой горизонтальной поверхности вследствие неустойчивого распределения температуры в пограничном слое. Конвективные струи формируются на некотором расстоянии от края нагреваемой области, если тепловой поток поддерживается постоянным, то это расстояние практически не изменяется. Они возникают периодически по времени, частота их образования возрастает, а расстояние между точками возникновения уменьшается с ростом подводимого теплового потока.



Рис. 5. Образование конвективных струй в области нагрева

Вторичные течения существенно влияют на процессы тепло-массообмена в пограничном слое, поэтому их исследование представляет большой интерес, как для фундаментальных, так и для прикладных задач.

4. Сравнение результатов

Были проведены расчеты исходной задачи в различных программных пакетах CFX и FLUENT. В качестве рабочей жидкости использовались вода (динамическая вязкость $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4}$ Па·с) и трансформаторное масло ($\mu = 6.7 \cdot 10^{-3}$ Па·с). Физическое время расчетов 150 секунд, этого было достаточно для выхода на периодический режим (имеется в виду формирование конвективных струй). Результаты приводятся в размерном виде, так как выбор безразмерных управляющих параметров для такой системы является нетривиальной задачей и это будет сделано в дальнейших работах.

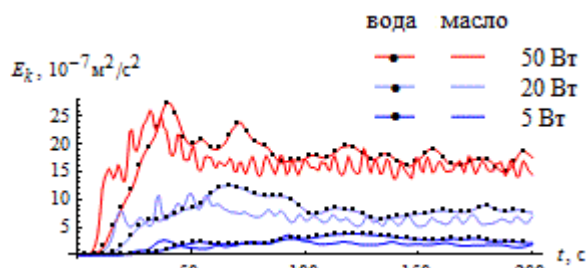


Рис. 6. График зависимости средней кинетической энергии от времени при разной мощности нагрева для воды и масла (CFX)

На рисунке 6 представлен график зависимости средней кинетической энергии от времени при разной мощности нагрева, полученного в CFX. Значение средней кинетической энергии в слое жидкости определяется следующим соотношением:

$$E_k = \frac{1}{2V} \int_V v^2(x, y, z) dx dy dz.$$

График показывает, что увеличение мощности нагрева приводит к заметно более интенсивному конвективному течению жидкости. Сравнивая графики средней кинетической энергии для воды и масла (Рис. 6), можно наблюдать, что течение воды более интенсивно по сравнению с течением масла, это обусловлено более высокими значениями потокового числа Грасгофа [4]. Так же наблюдая за поведением изменения кинетической энергии масла, можно увидеть, что оно происходит с некоторой периодичностью.

Для режимов конвективного течения масла и воды во FLUENT получились похожие результаты.

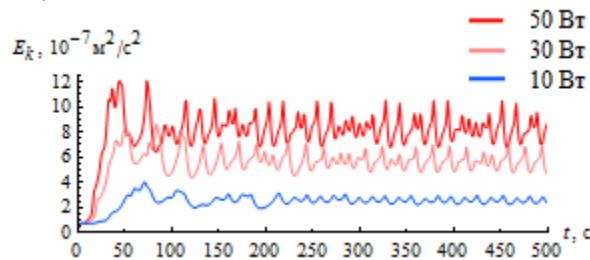


Рис. 7. График зависимости средней кинетической энергии от времени при разной мощности нагрева для воды (FLUENT)

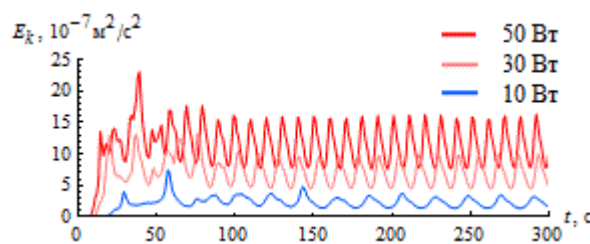


Рис. 8. График зависимости средней кинетической энергии от времени при разной мощности нагрева для масла (FLUENT)

Рисунки 7 и 8 иллюстрируют изменение кинетической энергии со временем при разной мощности нагрева для масла и воды. График для масла показывает, что периодическое колебание кинетической энергии происходит на сравнительно высоких частотах – признак влияния мелкомасштабных структур, частота возникновения которых высока.

График для воды показывает, что колебания также происходят и на низких частотах, что возможно связано с периодическими изменениями в основном потоке конвективной ячейки.

5. Сравнение численных и экспериментальных данных

Как было замечено ранее, конвективные струи возникают в фиксированных, регулярно расположенных точках поверхности, если тепловой поток поддерживается постоянным. Конвективные струи возникают периодически по времени.

Интересно рассмотреть поведение таких мелкомасштабных структур при разной мощности нагрева. Добавив точку наблюдения в непосредственной близости к очагу образования конвективной струи, можно наблюдать изменение температуры в этой точке при разной мощности нагрева.

В эксперименте были получены следующие значения частот генерации мелкомасштабных структур для масла при разной мощности нагрева (Табл. 1).

Таблица 1. Значения частот генерации мелкомасштабных структур для масла при разной мощности нагрева

P (Вт)	ν (1/с)	P (Вт)	ν (1/с)
5.7	0.068	26.3	0.211
10	0.113	30	0.246
15	0.146	35	0.282
20.3	0.179	40	0.288
		45	0.314

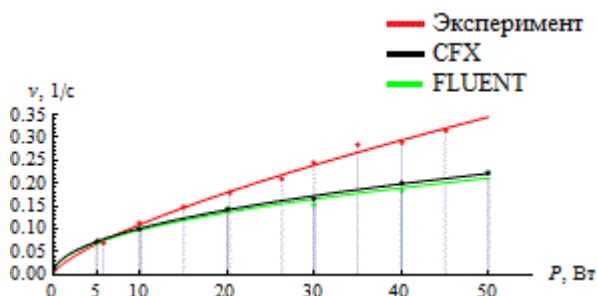


Рис. 9. Изменение частоты генерации мелкомасштабных структур ν в точке от мощности нагрева P

Из рисунка 9 видно, что графики изменения частоты генерации мелкомасштабных структур, полученных в CFX и FLUENT, почти совпадают. А экспериментальные данные хорошо согласуются с численными при малых мощностях нагрева и существенно различаются при высоких мощностях. Это объясняется тем, что с ростом нагрева реальное течение, исследуемое в эксперименте, теряет осесимметричность, а в двумерных расчетах мы навязываем условие осесимметричности.

6. Заключение

В данной работе были исследованы конвективные течения в цилиндрическом слое жидкости

с локализованным нагревом в центральной области в программном пакете ANSYS. Результаты проведенного исследования показали, что варьирование мощности нагрева в рамках используемой численной модели не приводит к существенным изменениям в структуре течений. От выбора жидкости и мощности нагревателя зависят только количественные характеристики: изменение интенсивности движения и частоты появления конвективной струи. С увеличением мощности нагрева увеличивается средняя кинетическая энергия течения, и частота появления вторичных структур в виде конвективных струй.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом, но только для малых мощностей нагрева, что показывает границы применимости осесимметричной модели.

Обнаружено наличие низкочастотных пульсаций кинетической энергии основного течения жидкости с малыми значениями вязкости (для воды), для проверки этого результата необходимо проведение экспериментальных измерений.

Авторы благодарны кафедрам МСС и ВТ и теоретической физики Пермского национального исследовательского государственного университета за предоставленную возможность проведения расчетов в пакете Ansys CFX и FLUENT.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН и молодежного исследовательского гранта УрО РАН.

Список литературы

1. Сухановский А.Н. Формирование дифференциального вращения в цилиндрическом слое жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 103-115
2. Batalov V., Sukhanovsky A. and Frick P. Laboratory study of differential rotation in a convective rotating layer // J. Geophys. Astrophys. Fluid Dynam. 104: 4, pp. 349 — 368, 2010. – DOI: 10.1080/03091921003759876.
3. Гершуни Г.З., Жуковицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука. – 1986. – С.7-12.
4. Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., and Frick P. Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems, Volume 85, Number 1 (2012), 15 p.

Modeling of convective flows in CFD-packages

A.V. Evgrafova², D.F. Ibraev¹, A.N. Sukhanovsky²

¹Perm State University, Russia, 614990, Perm, Bukireva st., 15

²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Russia, 614013, Perm, Ac. Koroleva st., 1

The results of numerical studies of the formation of convective flows in a cylindrical fluid layer with localized heating in the central part are demonstrated. For the numerical solution of the problem we used finite element software suite ANSYS. Calculations were carried out in two different software packages: CFX and FLUENT. Integral characteristics of convection flow are presented. A comparison of solutions obtained by different solvers, with the experimental data is shown.

Key words: *convection, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT*