
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.0, 532.5

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ РЕЛЕЯ-БЕНАРА
В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОММЕРЧЕСКИХ КОДОВ ANSYS CFX И STAR-CCM+****В.Ю. Волков**

ORCID: 0000-0003-0880-8509 e-mail: volkov_vu@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***Л.А. Голибродо**

ORCID: 0000-0001-8169-4136 e-mail: golibrodo_la@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***А.А. Крутиков**

ORCID: 0000-0002-0603-0177 e-mail: krutikov_aa@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***А.Ю. Кудрявцев**

ORCID: 0009-0008-7740-4149 e-mail: fazvonov@vniief.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

Представлено расчетное моделирование естественной конвекции Рэлея-Бенара в кубе при высоких значениях числа Рэлея. Эксперименты проведены в рамках отраслевого бенчмарка по верификации CFD-программ на базе гидродинамической лаборатории АО «ОКБМ Африкантов». В атомной отрасли данное явление представляет интерес при исследовании аварийных режимов, систем пассивной безопасности, систем охлаждения топлива и т.д., поскольку приводит к возникновению температурных пульсаций, влияющих на показания датчиков, а также вызывающих термоциклические нагрузки, которые приводят к снижению ресурса оборудования. Несмотря на наличие верификации разработчиком программного обеспечения, зачастую требуется дополнительная верификация CFD-моделей, разрабатываемых с применением коммерческих CFD-кодов, для подтверждения применимости в конкретном случае. Использование стандартных подходов и CFD-кодов в промышленных расчетах позволяет ускорить подготовку модели, но требует проверки применительно к конкретным условиям и процессам. Расчеты выполнены с использованием двух кодов – STAR-CCM+ и ANSYS CFX, и двух сеток – гексаэдрической и полиэдрической; их результаты хорошо согласуются с экспериментом. Несколько занижены значения пульсаций скорости, что ожидаемо следует из выбранного сеточного разрешения. Представленный подход предлагается использовать для моделирования задач данного класса.

Ключевые слова: CFD, естественная конвекция Рэлея-Бенара, CFX, STAR-CCM+, верификация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волков, В.Ю. Моделирование конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости с использованием коммерческих кодов ANSYS CFX и STAR-CCM+ / В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, А.Ю. Кудрявцев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 51-62. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_51

SIMULATION OF RAYLEIGH-BENARD CONVECTION IN A CUBIC CAVITY USING COMMERCIAL CODES ANSYS CFX AND STAR-CCM+

V.Yu. Volkov

ORCID: 0000-0003-0880-8509 e-mail: volkov_vu@grpress.podolsk.ru

JSC OKB «GIDROPRESS»

Podolsk, Russia

L.A. Golibrodo

ORCID: 0000-0001-8169-4136 e-mail: golibrodo_la@grpress.podolsk.ru

JSC OKB «GIDROPRESS»

Podolsk, Russia

A.A. Krutikov

ORCID: 0000-0002-0603-0177 e-mail: krutikov_aa@grpress.podolsk.ru

JSC OKB «GIDROPRESS»

Podolsk, Russia

A.Yu. Kudryavtsev

ORCID: 0009-0008-7740-4149 e-mail: fazvonov@vniief.ru

Federal State Unitary Enterprise «RFNC-VNIIEF»

Sarov, Russia

Abstract. A computational simulation of the natural Rayleigh-Benard convection in a cube has been carried out at high values of the Rayleigh number. Experimental studies have been carried out as part of the industry benchmark for verification of CFD codes at the hydrodynamic laboratory of JSC OKBM Afrikantov. This phenomenon is of interest in the nuclear industry in the study of emergency modes, passive safety systems, fuel cooling systems, etc. It leads to the occurrence of temperature pulsations that affect the readings of sensors, as well as causing thermal cycling loads that lead to a decrease in equipment life. Despite the presence of software verification performed by the developer, additional verification of CFD models developed using commercial CFD codes is often required to confirm the applicability of the selected mathematical models in a particular case. The use of standard approaches and CFD codes in industrial calculations makes it possible to speed up the preparation of the model, but requires verification in relation to specific conditions and processes. Calculations have been performed using two codes, STAR-CCM+ and ANSYS CFX, and two meshes, hexahedral and polyhedral. The calculation results are in good agreement with experiment. The values of velocity pulsations are underestimated, which is expected from the selected mesh resolution. The presented approach can be used to model problems of this class.

Key words: CFD, Rayleigh-Benard natural convection, CFX, STAR-CCM+, verification.

FOR CITATION: V.Yu. Volkov L.A. Golibrodo, A.A. Krutikov, A.YU. Kudryavtsev. Simulation of Rayleigh-Benard convection in a cubic cavity using commercial codes ANSYS CFX and STAR-CCM+. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 51-62. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_51

Введение

Естественная конвекция в замкнутых полостях вследствие температурного градиента в поле сил тяжести встречается как в природных процессах, так и в технических системах. В атомном машиностроении это явление представляет интерес при исследовании аварийных режимов, систем пассивной безопасности, систем охлаждения топлива и т.д. При высоких числах Релея возникают турбулентные нестационарные потоки, характеризующиеся наличием температурных пульсаций, влияющих на показания датчиков, показания которых часто используются в алгоритмах систем управления. Пульсации температуры вызывают термодинамические нагрузки, которые приводят к снижению ресурса оборудования. В ряде случаев естественная конвекция является основным механизмом переноса тепла, смешения различ-

ных сред. Актуальность данной тематики в атомной отрасли растет с развитием пассивных систем безопасности ядерных установок, работа которых зачастую основана на механизмах естественной конвекции. В настоящее время уровень развития вычислительной техники позволяет моделировать процессы естественной конвекции с использованием CFD-кодов, а необходимость их применения обусловлена целевыми параметрами расчетов: пространственными распределениями температуры, скоростью потока, а также характеристиками турбулентных пульсаций. Данное направление расчетов с использованием CFD-кодов отмечено как одно из приоритетных в рамках работы международной группы экспертов ОЭСР CFD4NRS [1]. В связи с этим данная задача была выбрана в качестве отраслевого бенчмарка по верификации CFD-программ на базе гидродинамической лаборатории АО «ОКБМ Африкантов» [2, 3]. В рамках бенчмарка исследовалась естественная конвекция в кубе при высоких значениях числа Релея. Особенность постановки задачи состоит в том, что нагревается нижняя стенка куба, а охлаждается верхняя. Несмотря на простоту геометрии, такая система характеризуется турбулентным течением среды и сложным динамическим поведением крупномасштабной усредненной циркуляции.

Эксперименты проведены двумя лабораториями (АО «ОКБМ Африкантов» и ИМСС УрО РАН) на отличающихся экспериментальных установках с использованием современного оборудования (PIV, LDV), позволяющего получить детальные сведения о структуре потока, необходимые для верификации CFD-программ. Несмотря на наличие верификации программного обеспечения, выполняемой разработчиком, зачастую требуется дополнительная верификация CFD-моделей, разрабатываемых с применением коммерческих CFD-кодов для подтверждения применимости выбранных математических моделей в конкретном случае [4]. Использование стандартных подходов и CFD-кодов в промышленных расчетах позволяет ускорить подготовку модели, но требует проверки применительно к конкретным условиям и процессам.

Постановка задачи

В рамках работы участниками бенчмарка были выполнены работы с использованием различных отечественных и зарубежных кодов (*FlowVision*, КОРСАР/CFD, ЛОГОС, ANSYS CFX) [5-9]. Целью данной работы является валидация и кросс-верификация коммерческих CFD-кодов STAR-CCM+ и ANSYS CFX на примере одного из режимов, характеризующегося параметрами, приведенными в табл. 1. Также проведено сравнение результатов, полученных на структурированной гексаэдрической сетке и полиэдрической сетке с помощью кода STAR-CCM+. Он преимущественно используется в промышленных расчетах, при этом зачастую применяют именно полиэдрические сетки, которые позволяют автоматизировать подготовку CFD-модели.

Таблица 1.
Параметры режима

Table 1.
Mode parameters

$T_0, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Pr	Ra
50	20	3.5	$16 \cdot 10^9$

Объектом исследования является экспериментальная установка по изучению естественной конвекции в кубической полости, установленная в ОКБМ «Африкантов». Модель экспериментального участка представлена на рис. 1. Он представляет собой кубическую полость со стороной $D=250$ мм. Кубическая полость заполнена дистиллированной водой. Горизонтальные стенки изготовлены из алюминия и выполняют роль теплообменников, а вертикальные стенки изготовлены из оргстекла.

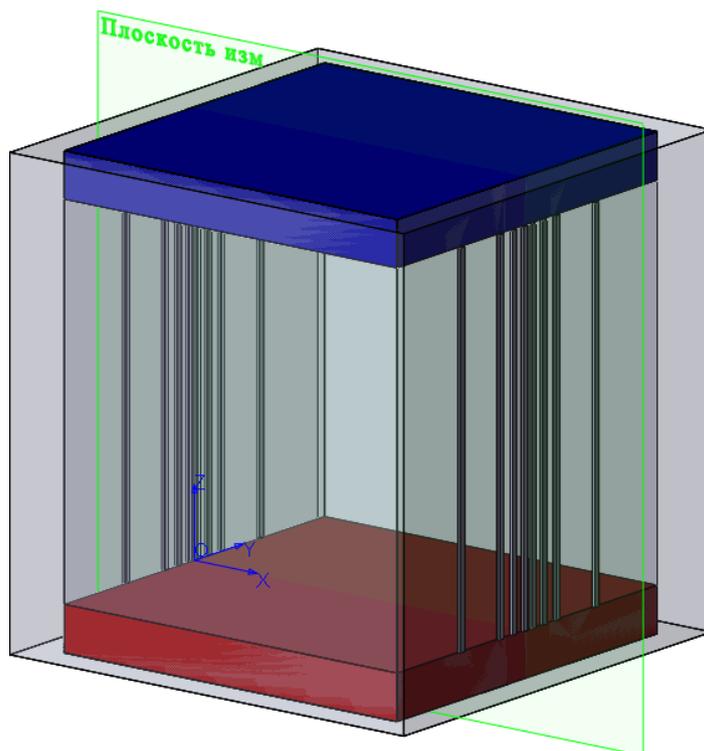


Рис. 1. Модель экспериментального участка

Fig. 1. Experimental area model

Через верхний теплообменник прокачивается проточная вода, обеспечивающая поддержание требуемой температуры ($T_0 - 0.5\Delta T$). Температура нагревателя внизу ($T_0 + 0.5\Delta T$) поддерживается с помощью регулировки мощности электрического нагревателя. Все измерения выполнены в центральном вертикальном сечении полости XOZ (рис. 1). Используемый метод PIV основан на измерении перемещения полиамидных частиц нейтральной плавучести в плоскости лазерного светового ножа; измерительная область имела размер 250×250 мм. Также было получено поле кинетической энергии турбулентности для двух компонент скорости. Целевыми параметрами расчетов являются усредненные по времени скорость и кинетическая энергия турбулентности.

При проведении расчетов использовались следующие допущения:

- стенки проточной части считаются гидравлически гладкими поверхностями с условиями прилипания;
- теплоноситель – сплошная несжимаемая однофазная ньютоновская жидкость;
- течение теплоносителя – нестационарное;
- режим течения теплоносителя – турбулентный;
- при получении начальных условий течение описывается уравнениями Рейнольдса, замыкание осуществляется с использованием двухпараметрических моделей турбулентности;
- при моделировании процесса течения описывается уравнениями Навье-Стокса с применением пространственной фильтрации замыкание осуществляется с использованием вихреразрешающих моделей турбулентности;
- потерями тепла в окружающую среду пренебрегают;
- перетечки тепла по стенкам не учитываются;
- вспомогательные системы не оказывают влияния на тепломассообмен в расчетной области;
- малыми геометрическими элементами, не оказывающими значительного влияния на гидродинамические процессы, пренебрегают;
- внешняя камера не включена в расчетную область и учитывается граничными условиями.

Геометрическая модель расчетной области представляет собой твердотельную модель проточного тракта (рис. 2). Она включает в себя объем жидкости во внутреннем кубе с водой (область исследования). Дополнительно при подготовке геометрической модели применены следующие упрощения:

- геометрия расчетной области считается идеально соответствующей номинальным размерам, отклонения геометрии отсутствуют;
- куб идеально ориентирован по осям системы координат;
- боковые стенки куба адиабатические;
- горячая и холодная пластины учитываются с помощью граничных условий первого рода.

Для расчета полей скорости, давления и кинетической энергии турбулентности используется моделирование в нестационарной постановке с использованием вихреразрешающих моделей. Использование вихреразрешающих моделей в этом случае обусловлено необходимостью определения пространственного распределения кинетической энергии турбулентности, характеризующей пульсации скорости. Отметим, что в [5-7] были также проведены расчеты с использованием моделей турбулентности класса RANS и показано, что результаты расчета и эксперимента хорошо согласуются по профилям скорости. Фактически это означает, что если для расчета неважно определение характеристик пульсаций потока, то вполне допустимо использовать гораздо более экономичные с вычислительной точки зрения модели турбулентности.

Для проведения нестационарного моделирования процессов естественной конвекции в экспериментальном участке использовалась модель турбулентности LES-WALE, а для получения начальных условий в стационарной постановке использовалась модель турбулентности K-Omega-SST [10]. Расчетная область образована граничными поверхностями, на которых задаются граничные условия (рис. 2). На стенках расчетной области используется граничное условие прилипания для уравнений движения. На горячей и холодной поверхностях используются граничные условия первого рода для уравнения энергии. На боковых стенках заданы адиабатические граничные условия. В качестве начального приближения для стационарного расчета используются нулевые скорости и атмосферное давление, нулевые параметры турбулентности, среднее значение температуры. В качестве начальных условий для нестационарного расчета используются результаты стационарного расчета. Свойства воды приняты в соответствии со стандартом IAPWS [11].

Расчет был выполнен в нестационарной постановке в два этапа. На первом этапе проводился расчет до установления режимных параметров в расчетной области. На втором этапе полученные результаты использовались в качестве начальных условий для расчета с усреднением по времени. Для определения полей, усредненных скорости и кинетической энергии турбулентности, проводился постпроцессинг в процессе решения с использованием формул с накоплением. В стационарном расчете используются противопотоковые численные схемы второго порядка (для турбулентности – первого). В нестационарном расчете используется схема центральных разностей с ограничением, рекомендуемая разработчиками при использовании моделей класса LES. Шаг по времени выбирался таким образом, чтобы выполнялось условие равенства числа Куранта единице. В ходе решения выполнялся мониторинг скорости и температуры в нескольких точках расчетной области для определения момента установления режимных параметров в расчетной области. Для расчетов были разработаны две сеточные модели: структурированная блочная сетка на базе гексаэдрических элементов, разработанная с помощью пакета ANSYS ICEM-CFD, и сетка на основе многогранников общей формы (полиэдров), созданная инструментами кода STAR-CCM+. Разрешение блочно-структурированной сеточной модели по ребрам составило 100x100x100 элементов (рис. 3 а). Использовалось равномерное разбиение сеточной модели по всем направлениям, рекомендуемое для использования совместно с вихреразрешающими моделями. Количество элементов – 1 млн, характерный размер ячейки 2,5 мм. Полиэдрическая сетка несколько более подробна (рис. 3 б). Количество элементов составляет 2,3 млн, характерный размер ячейки: 2 мм.

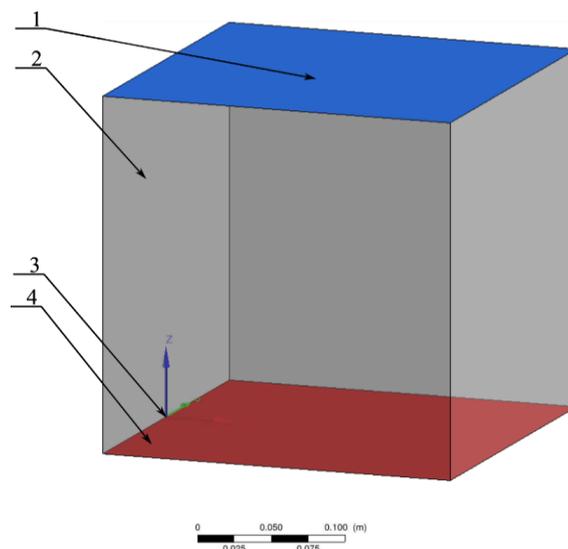


Рис. 2. Геометрическая модель расчетной области
 1 – холодная стенка, 2 – адиабатическая стенка,
 3 – начало координат, 4 – горячая стенка

Fig. 2. Geometric model of the computational domain
 1 – cold wall, 2 – adiabatic wall, 3 – origin, 4 – hot wall

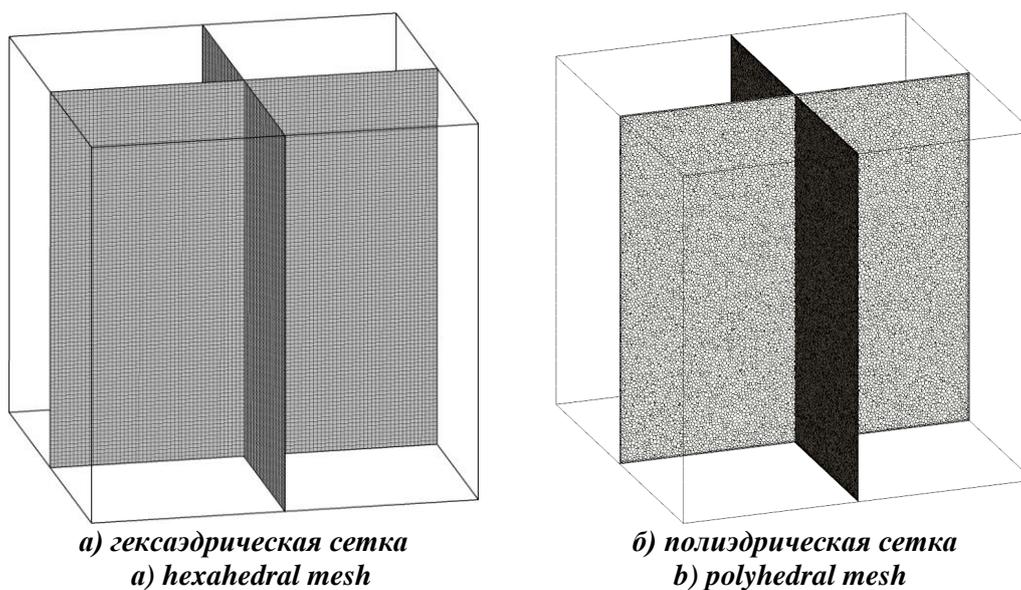


Рис. 3. Сеточная модель

Fig. 3. Mesh model

Результаты расчетов

Расчеты с помощью кода CFX были выполнены с использованием гексаэдрической сеточной модели. В коде STAR-CCM+ использовались обе сеточные модели. По результатам расчетов получены распределения мгновенных и усредненных значений скорости и температуры в расчетной области. Распределение мгновенных значений скорости в сечениях расчетной области представлено на рис. 4 а. Наблюдается сложная вихревая картина течения. Распределение усредненных значений скорости в сечениях расчетной области представлено на рис. 4 б. Наблюдается глобальная направленная циркуляция в расчетной области.

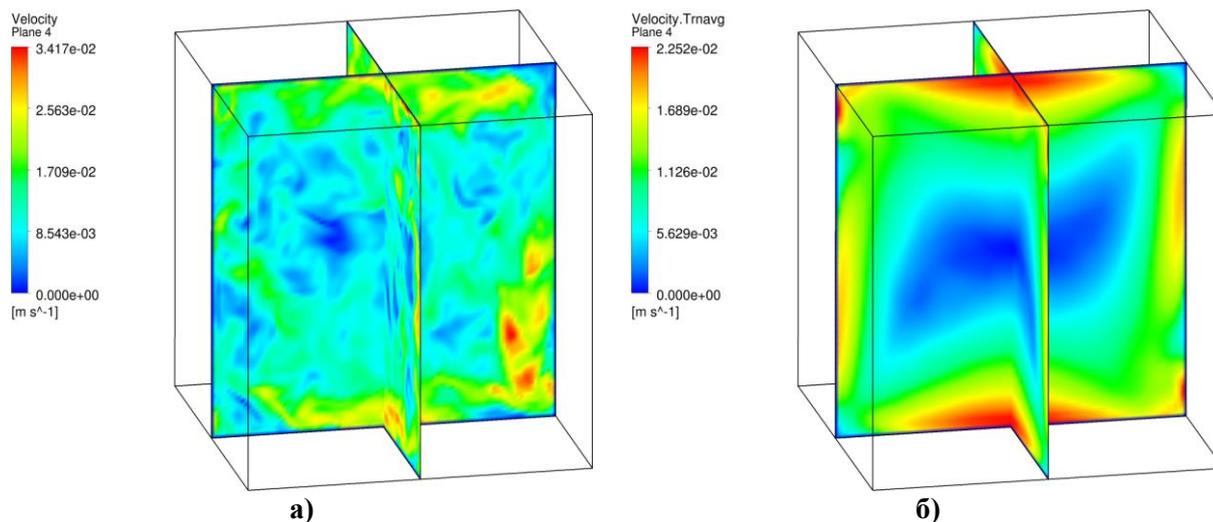


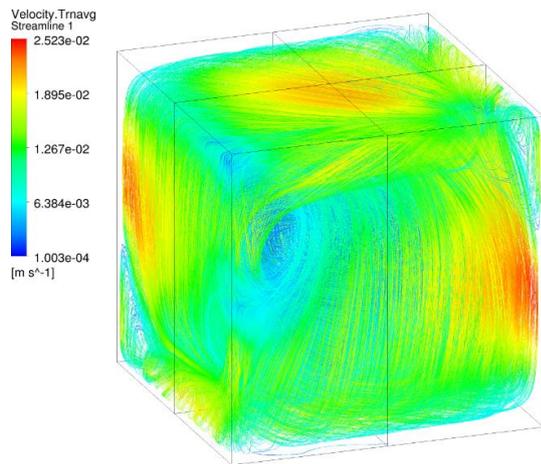
Рис. 4. Распределение значений скорости (мгновенных и усредненных) в сечениях расчетной области (ANSYS CFX)

Fig. 4. Distribution of velocity values (instantaneous and averaged) in sections of the computational domain (ANSYS CFX)

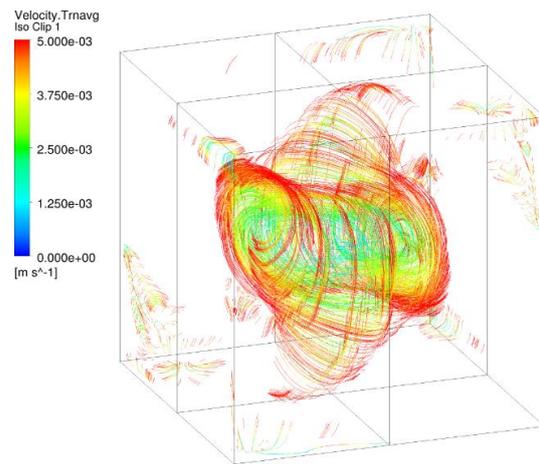
Для более детального анализа структуры усредненного течения на рис. 5 (а, в, д) представлены линии тока в расчетной области. Кроме выраженной глобальной циркуляции вдоль главной диагонали, наблюдаются отдельные зоны циркуляции в углах расчетной области и крупномасштабные вихри вблизи боковых стенок. Структура внутреннего вихря главной циркуляции представлена на рис. 5 (б, г, е). Хотя на главной диагонали вихрь главной циркуляции един, при приближении к углам он распадается на четыре вихря меньшего размера, каждый из которых заканчивается на соответствующей боковой стенке. Направление вращения всех четырех вихрей одинаково. Однако наблюдаются некоторые отличия между расчетами, при этом результаты CFX на гексаэдрической сетке похожи на результаты STAR-CCM+ на полиэдрической сетке.

На рис. 6 а представлено распределение мгновенных значений температуры в сечениях расчетной области. Наблюдается практически равномерное распределение температуры в расчетной области, максимальные градиенты температуры сосредоточены вблизи обогреваемой и охлаждаемой поверхностей. Также наблюдаются отдельные термики, направленные как от горячей к холодной пластине, так и наоборот; они распадаются вблизи соответствующей поверхности, на которой они возникают. В центральной части расчетной области распределение температуры почти равномерно. На распределении усредненных значений температуры в сечениях расчетной области (рис. 6 б) термиков не наблюдается, в остальном картина аналогичная представленной на рис. 6 а).

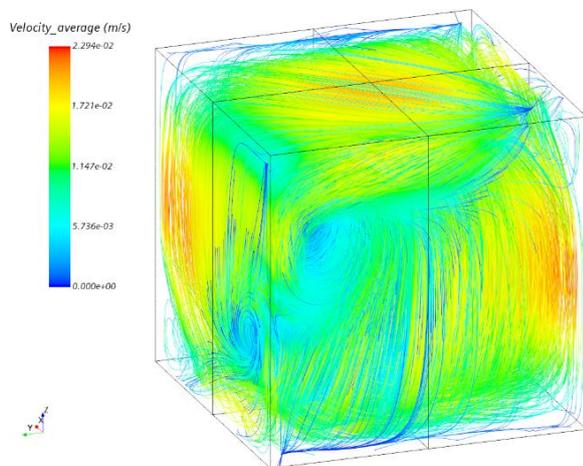
Было проведено сравнение результатов расчета с экспериментом. Сравнение по модулю усредненной скорости представлено на рис. 7, где отражены распределения скорости на поверхности, используемой для измерений в эксперименте. Черными линиями обозначены границы этой поверхности. Поскольку поверхность выходит за границы исследуемой области, часть измерений попадает внутрь оргстекла, в связи с чем логично ожидать там нулевых значений скорости. Для удобства белым прямоугольником обозначены границы внутренней полости куба размером 250x250 мм. В соответствии с [2, 3] отмечено, что вблизи стенок экспериментальные данные не репрезентативны, в связи с чем на рисунке в этих областях значения скорости нулевые. Видно, что качественно и количественно результаты расчета и эксперимента соответствуют друг другу. Отметим, что возможно несколько вариантов реализации глобальной циркуляции, это необходимо учитывать при обработке результатов.



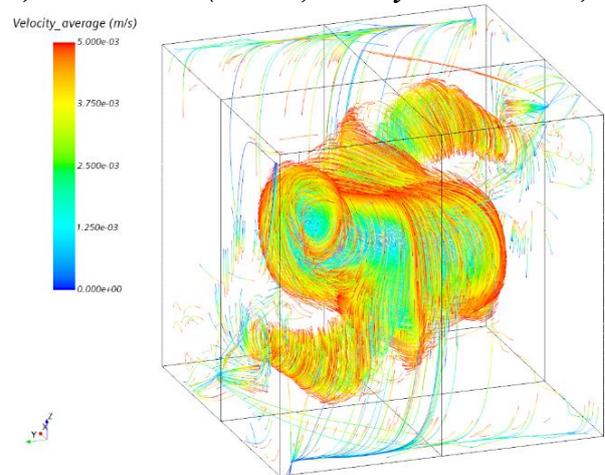
a) ANSYS CFX (сетка 1)
a) ANSYS CFX (mesh 1)



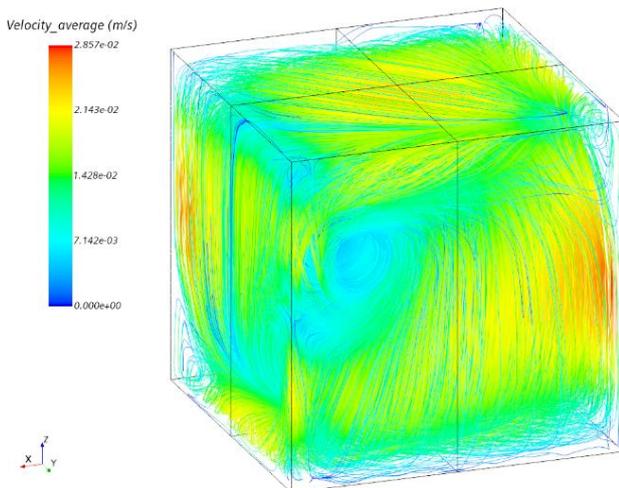
б) ANSYS CFX (сетка 1, скорость ниже 5 мм/с)
b) ANSYS CFX (mesh 1, velocity below 5 mm/s)



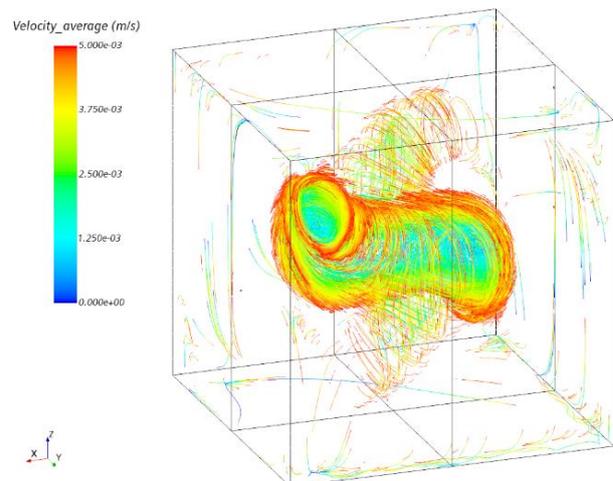
в) STAR-CCM+ (сетка 1)
c) STAR-CCM+ (mesh 1)



г) STAR-CCM+ (сетка 1, скорость ниже 5 мм/с)
d) STAR-CCM+ (mesh 1, velocity below 5 mm/s)



д) STAR-CCM+ (сетка 2)
e) STAR-CCM+ (mesh 2)



е) STAR-CCM+ (сетка 2, скорость ниже 5 мм/с)
f) STAR-CCM+ (mesh 2, velocity below 5 mm/s)

Рис. 5. Линии тока в расчетной области

Fig. 5. Streamlines in the computational domain

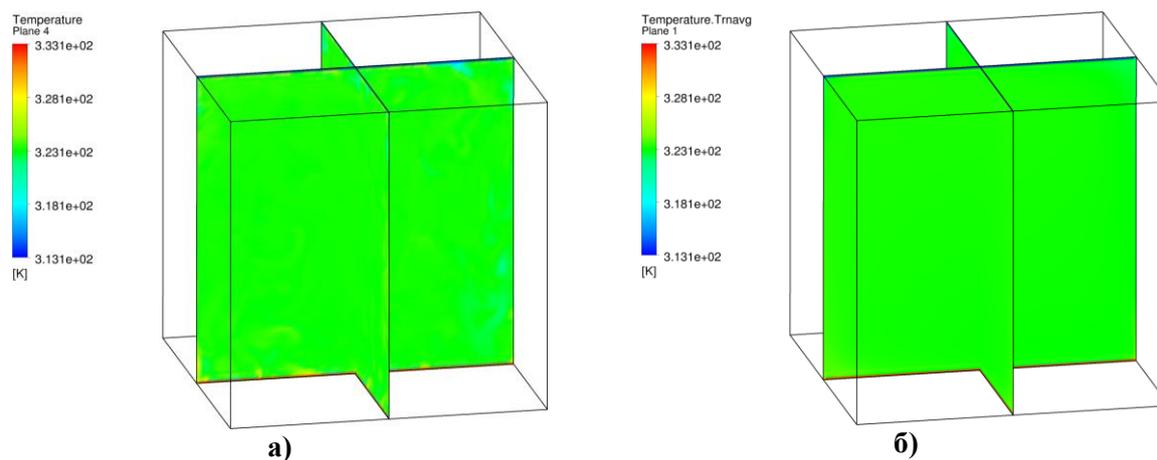


Рис. 6. Распределение значений температуры (мгновенных и усредненных) в сечениях расчетной области (ANSYS CFX)

Fig. 6. Distribution of temperature values (instantaneous and averaged) in sections of the computational domain (ANSYS CFX)

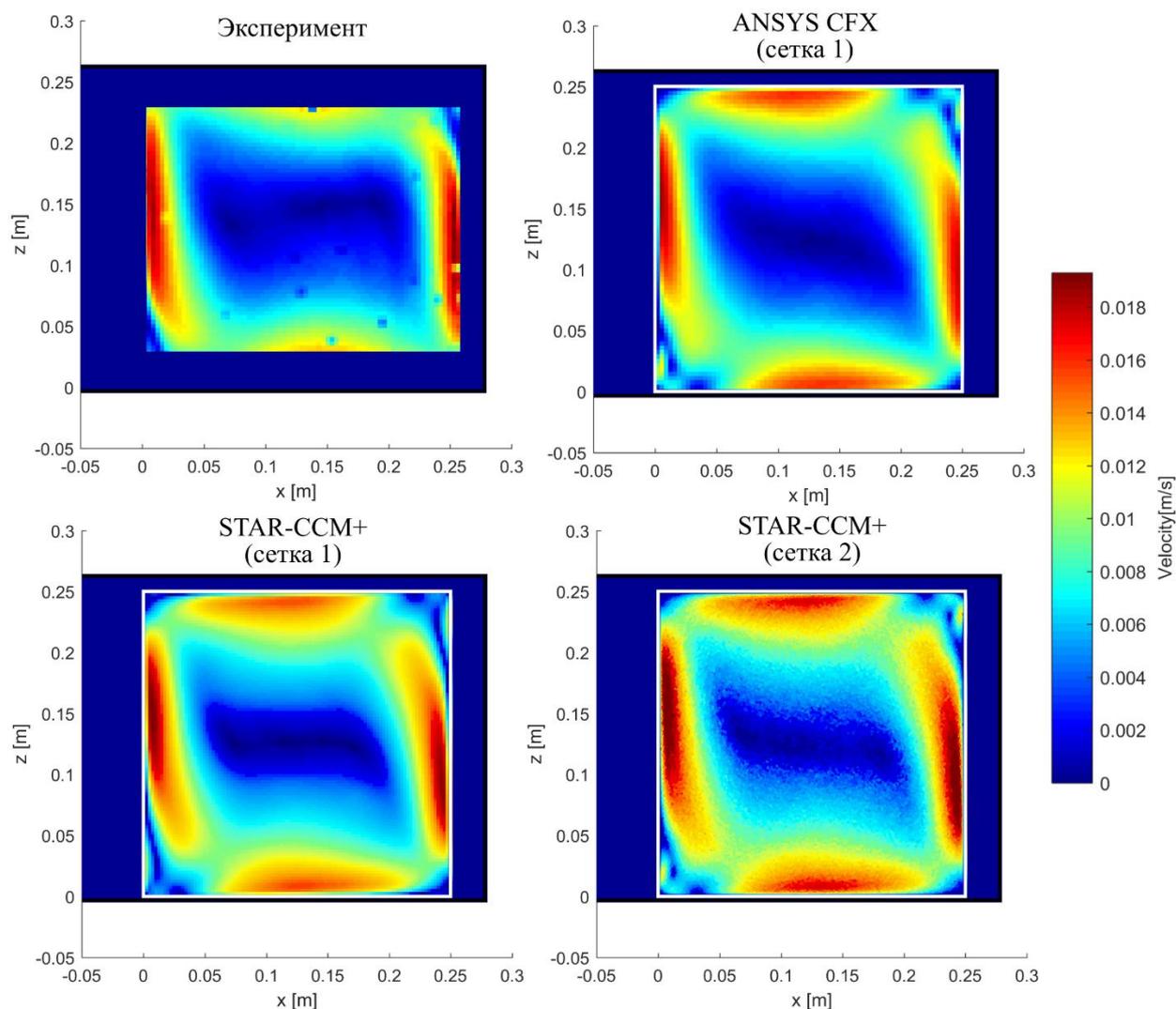


Рис. 7. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости

Fig. 7. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity

Для более детального качественного сопоставления эксперимента с расчетом были построены графики изменения скорости вдоль центральных вертикальной и горизонтальной линий в плоскости измерений (рис. 8 и 9). Наблюдается хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента. Можно отметить, что результаты, полученные с помощью STAR-CCM+ на полиэдрической сетке ближе к экспериментальным данным. Вдоль вертикальной линии в экспериментальных данных наблюдаются некоторые отклонения от симметрии, которые не воспроизводятся в расчетах.

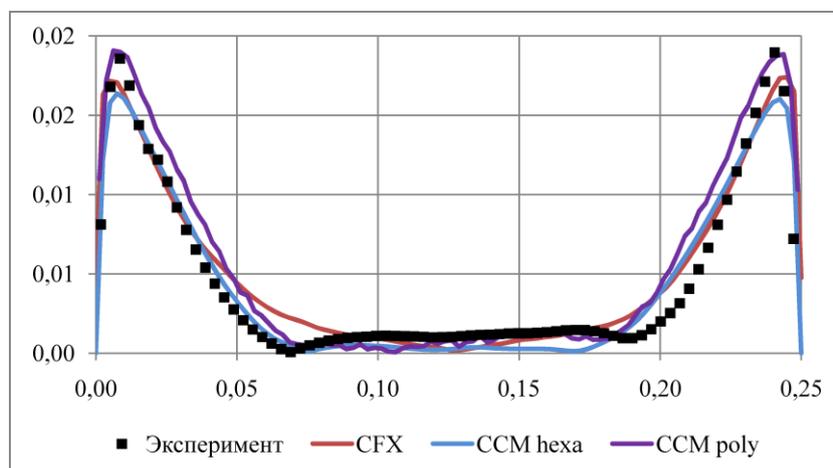


Рис. 8. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости вдоль горизонтальной линии

Fig. 8. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity along a horizontal line

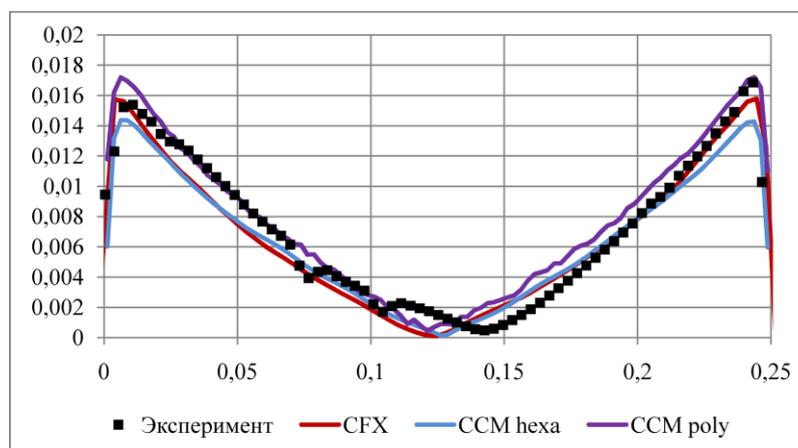


Рис. 9. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости вдоль вертикальной линии

Fig. 9. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity along a vertical line

Сравнение расчета с экспериментом по кинетической энергии турбулентности вдоль диагонали в плоскости измерений представлено на рис. 10. Качественно результаты расчета и эксперимента схожи между собой, но расчет несколько занижает амплитуду пульсаций. Это обусловлено использованием моделей турбулентности класса LES. Качественное сходство графиков при некотором систематическом занижении пульсаций свидетельствует, что частота отсечения турбулентного спектра находится в инерционном интервале вихрей, это корректно для данного класса моделей. Однако отброшенная часть спектра в результатах расчета не учитывается, что приводит к систематическому занижению пульсаций. Для уменьшения погрешности требуется использование более подробной сетки. Также можно отметить, что результаты STAR-CCM+, полученные на гексаэдрической сетке, существенно

ниже экспериментальных значений и результатов ANSYS CFX на той же сетке. Это связано с тем, что в STAR-CCM+ иная реализация схемы центральных разностей с ограничением, которая фактически в большей мере работает как классическая противопотоковая схема второго порядка. Альтернативный метод – использование численных схем более высоких порядков в случае, если цель расчета предусматривает точное моделирование пульсаций потока.

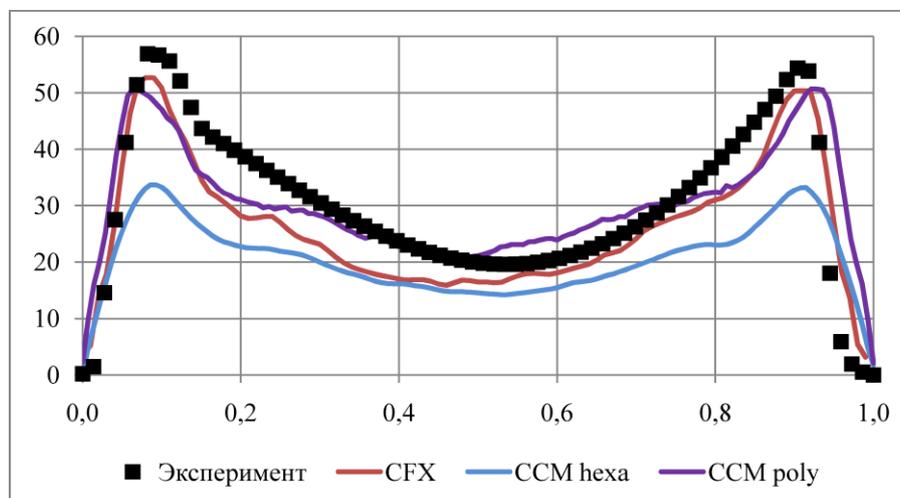


Рис. 10. Сравнение расчета с экспериментом по кинетической энергии турбулентности вдоль диагонали в плоскости измерений

Fig. 10. Comparison of calculation with experiment on the kinetic energy of turbulence along the diagonal in the measurement plane

Заключение

Выполнено моделирование выбранного режима отраслевого бенчмарка, посвященного исследованию конвекции Рэля-Бенара в кубической полости с обогреваемой нижней стенкой и охлаждаемой верхней стенкой (на базе гидродинамической лаборатории «ОКБМ Африкантов»). Целевыми параметрами расчета являлись усредненные поля компонент скорости в центральном вертикальном сечении полости, а также усредненные поля компонент пульсаций скорости. Выполнены расчеты с использованием двух кодов – STAR-CCM+ и ANSYS CFX, и двух сеток – гексаэдрической и полиэдрической.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Несколько занижены значения пульсаций скорости, что ожидаемо следует из выбранного сеточного разрешения. Полученные результаты могут использоваться для верификации при разработке CFD-моделей оборудования АЭС, включающих моделирование процессов естественной конвекции, а также при аттестации CFD-кодов. Полученный опыт также применим для выбора моделей и их параметров для моделирования процессов естественной конвекции при высоких числах Релея. Для уменьшения погрешности определения пульсаций целесообразно использование сеточных моделей с большим разрешением, особенно при использовании кода STAR-CCM+. Также необходимо учитывать особенности реализации численных схем в различных кодах. Вместе с тем, применение стандартных подходов и CFD-кодов, зачастую используемых в промышленных расчетах, позволяет с приемлемой точностью моделировать данные процессы в реальных конструкциях.

Библиографический список

1. Assessment of computational fluid dynamics (CFD) for nuclear reactor safety problems, NEA/CSNI/R (2007)13. OECD/NEA, 2007.
2. **Большухин, М.А.** Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / М.А. Большухин, А.Ю. Васильев, А.В. Будников, Д.Н. Патрушев, Р.И. Романов, Д.Н. Свешников, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик // Вычислительная Механика Сплошных Сред. 2012. Том 5. № 4. С. 469-480.
3. **Vasiliev, A.** High Rayleigh Number Convection in a Cubic Cell with Adiabatic Sidewalls / A. Vasiliev, A. Sukhanovskii, P. Frick, A. Budnikov, V. Fomichev, M. Bolshukhin, R. Romanov // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016.
4. Report. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications. NEA/CSNI/R(2007)5, Nuclear Energy Agency Committee On The Safety Of Nuclear Installations, 2007.
5. **Козелков, А.С.** Верификация ПК «ЛОГОС» на эксперименте BALI / А.С. Козелков, Н.А. Кочетов, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин, А.С. Сидоров, Ю.А. Цибирева. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-084.pdf> (дата обращения 02.05.2023).
6. **Дмитриев, С.М.** Применение полуэмпирических моделей турбулентности для моделирования турбулентной конвекции / С.М. Дмитриев, О.Л. Крутякова, А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин, Д.А. Уткин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 18-33.
7. **Dmitriev, S.** Simulation of Turbulent Convection at High Rayleigh Numbers / S. Dmitriev, A. Kozelkov, A. Kurkin, M. Legchanov, N. Tarasova, V. Kurulin, V. Efremov, R. Shamin // Modelling and Simulation in Engineering 2018(3):1-12. [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/322364229_Simulation_of_Turbulent_Convection_at_High_Rayleigh_Numbers (дата обращения 1.05.2023). DOI: 10.1155/2018/5781602
8. ООО «ТЕСИС». Об исследовании конвекции Рэлея-Бенара в рамках отраслевого CFD бенчмарка на базе экспериментальной модели АО «ОКБМ Африкантов». Материалы научно-технической конференции «Проблемы применения и верификации CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 2018. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.okbm.nnov.ru/media-center/news/materialy-mezhotraslevoyn-nauchno-tekhnicheskoy-konferentsii-cfd-2018/> (Дата обращения 15.04.2023).
9. **Чепилко, С.С.** Моделирование конвекции Рэлея-Бенара методомILES по расчетному коду КОРСАР/CFD / С.С. Чепилко, Д.С. Кастерин // Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике: научно-техн. конференция: материалы конференции. 2018. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.okbm.nnov.ru/media-center/news/materialy-mezhotraslevoyn-nauchno-tekhnicheskoy-konferentsii-cfd-2018/> (Дата обращения 15.04.2023).
10. **Menter, F.R.** Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA journal. 1994. № 8.
11. **Wagner, W.** et al. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, ASME J. Eng. Gas Turbines and Power, 2000, 122.

**Дата поступления
в редакцию: 12.05.2023**

**Дата принятия
к публикации: 05.07.2023**