

ФИЗИКА

УДК 536.2.023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

*Калбекова Махбурат Жамшитбековна,
преподаватель, mkalbekova@list.ru*

*Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, д.ф.-м.н., доцент
kurbanaliev@rambler.ru*

Ошский государственный университет, Ош, Кыргызстан

***Аннотация.** Насущная проблема разработки альтернативных возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи, задача обеспечения эффективных методов охлаждения структурных элементов современных компьютерных вычислительных систем, а также вопросы охлаждения ядерных реакторов определяют актуальность данной работы. Рассмотрена задача математического моделирования естественной конвекции в трехмерной модели помещения с источником отопления высотой 0.5 м, шириной 1 м и глубиной 1 м температура которого равна 500°K. Температуры пола, потолка и боковых стенок комнаты были равны 300 °K. Математическую основу моделирования составляют осредненные по Рейнольдсу трехмерные стационарные уравнений Навье-Стокса, дополненные соответствующими уравнениями. Стандартный решатель buoyantSimpleFoam открытого пакета OpenFOAM был использован для математического моделирования с учетом различных моделей радиационного излучения.*

***Ключевые слова:** Трехмерная модель комнаты, Естественная конвекция, Навье-Стокс, плавучесть, радиация, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.*

ТИК БУРЧТУУ КӨНДӨЙДӨГҮ ТАБИГЫЙ КОНВЕКЦИЯНЫ РАДИАЦИЯЛЫК НУРЛАНУУНУ ЭСКЕ АЛУУ МЕНЕН OPENFOAM ПАКЕТИНДЕ МОДЕЛДӨӨ

*Калбекова Махбурат Жамшитбековна, преподаватель
mkalbekova@list.ru*

Аннотация. Күн батареялары сыяктуу энергиянын альтернативалуу булактарын өнүктүрүүнүн актуалдуу маселеси, заманбап компьютердик эсептөө системаларынын структуралык элементтерин муздатуу үчүн эффективдүү методдорду камсыз кылуу маселеси, ошондой эле ядролук реакторлорду муздатуу маселелери бул иштин актуалдуулугун аныктайт. Температурасы 500К бийиктиги 0,5м, туурасы 1м жана тереңдиги 1м жылытуу булагы бар бөлмөнүн үч өлчөмдүү моделдинде табигый конвекцияны математикалык моделдөө маселеси каралат. Бөлмөнүн полунун, шыбынын жана каптал дубалдарынын температурасы 300К болгон. Моделдештирүүнүн математикалык негизин Рейнольдс боюнча орточо алынган үч өлчөмдүү стационардык Навье-Стокс теңдемелери түзөт, алар тиешелүү теңдемелер менен толукталган. OpenFOAM ачык булак пакетинин стандарттуу `buoyantSimpleFoam` чечүүчүсү ар кандай нурлануу моделдерин эске алуу менен математикалык моделдөө үчүн колдонулган.

Ачкыч сөздөр: үч өлчөмдүү бөлмөнүн модели, табигый конвекция, Навье Стокс, калкыма, радиация, `buoyantSimpleFoam`, `OpenFOAM`

SIMULATION OF NATURAL CONVECTION IN A RECTANGULAR CAVITY TAKING INTO ACCOUNT RADIATION HEAT TRANSFER IN THE OPENFOAM PACKAGE

Kalbekova Mahburat Zhamshitbekovna, teacher

mkalbekova@list.ru

Kurbanaliev Abdikerim Yrysaevich,

doctor of physical and mathematical sciences, dosent,

kurbanaliev@rambler.ru

Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

Abstract. The urgent problem of developing alternative renewable energy sources such as solar panels, the task of providing effective methods for cooling the structural elements of modern computer computing systems, as well as the issues of cooling nuclear reactors determine the relevance of this work. The problem of mathematical modeling of natural convection in a three-dimensional model of a room with a heating source with a height of 0.5m, a width of 1m and a depth of 1m, the temperature of which is 500K, is considered approach. The temperatures of the floor, ceiling and side walls of the room were 300K. The mathematical basis of the modeling is the Reynolds-averaged three-dimensional stationary Navier-Stokes equations, supplemented by the corresponding equations. The

standard buoyantSimpleFoam solver of the open source package OpenFOAM was used for mathematical modeling taking into account various radiation models.

Keywords: *Three-dimensional model of a room, Natural convection, Navier-Stokes, buoyancy, radiation, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.*

Введение. В данное время, обеспечение оптимальной вентиляции различных сооружений, методы охлаждения элементов крупных вычислительных систем, безопасное функционирование действующих ядерных реакторов, создание эффективных солнечных тепловых приемников представляют собой актуальную научно-техническую задачу [1 - 5]. Определенные проблемы, которые возникают при проведении натурных экспериментальных методов наряду с развитием методов вычислительной гидродинамики с применением современных мощных вычислительных, сделали математическое моделирование таких научно-технических задач экономически целесообразным [6, 7].

В данной работе рассматривается математическое моделирование турбулентной естественной конвекции в прямоугольной модели комнаты, заполненной воздухом. Моделирование проведено с использованием решателя `buoyantSimpleFoam` различных версий открытого пакета OpenFOAM [8].

Постановка задачи. Рассматривается задача математического моделирования естественной стационарной конвекции в трёхмерной камере с прямоугольным поперечным сечением [9]. Высота модели комнаты равна $H=2$, длина $W=10$ м, а ширина $D=6$ м, а источник тепла имеет следующие размеры $h=0.5$ м, $w=1.0$ м и $d=1.0$ м (см. рис. 1). Источник тепла расположен внутри параллелепипеда с координатами $(0.5 \ 0.5 \ 0)$ и $(1.5 \ 1.5 \ 0.5)$.

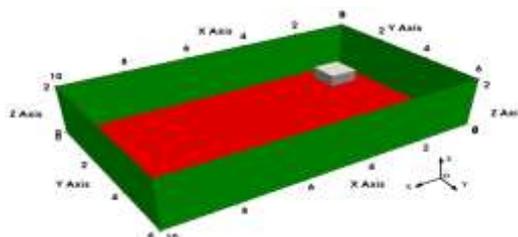


Рисунок 1. Геометрия рассматриваемой задачи и система координат.

Температура потолка и пола равны 300°K , а температура нагревателя, расположенного в верхнем правом углу модели, равна 500°K .

Математическая модель. Математическая модель рассматриваемой стационарной задачи основана на системе уравнений Навье-Стокса, в которую входят уравнения неразрывности, переноса импульса и энтальпии:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(u)) - \nabla \left(\frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot u) \right) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho u h) + \nabla \cdot (\rho u k) = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) + \rho u \cdot g \quad (3)$$

Здесь ρ – плотность, p – статическое давление, g – вектор гравитационного ускорения, μ_{eff} – эффективная вязкость, равная сумме молекулярной и турбулентной вязкостей, h – энтальпия, $k = 0.5|u|^2$ – кинетическая энергия на единицу массы, а $D(u)$ – тензор скорости деформации определяется как

$$D(u) = 0.5(\nabla u + (\nabla u)^T)$$

Коэффициент эффективной температуропроводности α_{eff} равен сумме коэффициентов ламинарной и турбулентной температуропроводностей:

$$\alpha_{eff} = \frac{\rho \nu_t}{Pr_t} + \frac{\mu}{Pr} = \frac{\rho \nu_t}{Pr_t} + \frac{\kappa}{C_p}$$

где κ – коэффициент теплопроводности, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, μ – коэффициент динамической вязкости, ν_t – турбулентная кинематическая вязкость, Pr – число Прандтля, Pr_t – турбулентное число Прандтля

В пакете OpenFOAM, члены в уравнении (2), связанные с градиентом статического давления и вектором гравитационного ускорения записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 -\nabla p + \rho g &= -\nabla(p_{rgh} + \rho g \cdot r) + \rho g \\
 &= -\nabla p_{rgh} - (g \cdot r)\nabla \rho - \rho g + \rho g \\
 &= -\nabla p_{rgh} - (g \cdot r)\nabla \rho
 \end{aligned}$$

где $p_{rgh} = p - \rho g \cdot r$ – полное давление минус гидростатическое давление, а r – радиус вектор.

Для замыкания систем уравнений (1-3) была использована стандартная стандартная k-ε модель турбулентности [9, 11].

Моделирование радиационного переноса тепла производилось на основе двух моделей – P1 и fvDOM моделей излучения, имплементированных в пакет OpenFOAM [8].

Численная модель. Дискретизация расчетной области получена при помощи стандартной утилиты blockMesh открытого пакета OpenFOAM. Постоянная таким образом равномерная структурированная трёхмерная расчетная сетки приведена на рис. 2.

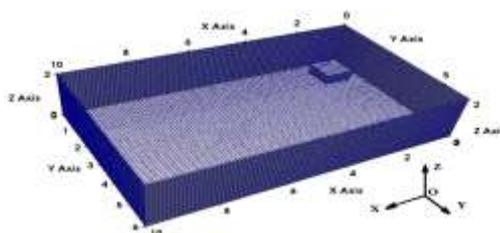


Рисунок 2. Расчетная сетка

Дискретизация основных уравнений (1-3) выполнена на основе метода контрольных объемов [9-11]. Используемые схемы дискретизации для каждого члена уравнений (1-3), связанного с градиентом, дивергенцией и лапласианом, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Схемы дискретизации.

Схема	gradSchemes	divSchemes	laplacianSchemes
Переменная			
Скорость, U	Gauss linear	bounded Gauss	Gauss linear

		upwind	corrected
Энтальпия, h	Gauss linear	bounded Gauss upwind	Gauss linear corrected
Скорость диссипации, ε	Gauss linear	bounded Gauss upwind	Gauss linear corrected
Напряжения Рейнольдса, R	Gauss linear	bounded Gauss upwind	Gauss linear corrected

Использованные граничные условия для основных переменных приведены в табл. 2.

Таблица 2. Граничные условия для переменных.

Граница Переменная	Потолок	Пол	Боковые стенки	Нагреватель
Скорость, U	noSlip	noSlip	noSlip	noSlip
Температура, T	fixedValue, 300°K	fixedValue 300°K	fixedValue 300°K	fixedValue, 500°K
Давление, p_{rgh}	FixedFluxPressure, 101325	FixedFluxPressure 101325	FixedFluxPressure 101325	FixedFluxPressure 101325
Энергия турбулентности, k	kqRWallFunction; 0.1	kqRWallFunction ; 0.1	kqRWallFunction; 0.1	kqRWallFunction; n; 0.1
Скорость диссипации, ε	epsilonWall Function 0.01	epsilonWall Function 0.01	epsilonWall Function 0.01	epsilonWall Function 0.01

Методы решения полученных в результате дискретизации основных уравнений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
Давления	Метод сопряженных градиентов PCG с использованием предобуслователя DIC	$1e^{-6}$
U, h, k, ε	PBiCGStab с использованием предобуслователя DILU	$1e^{-5}$

Для решения связанных через давление нелинейных уравнений применялся известный алгоритм SIMPLE [9-11] с коэффициентами нижней релаксации 0.2 для компонент скорости U , 0.2 для энтальпии h и 0.5 для кинетической энергии турбулентности k и скорости её диссипации ϵ .

Результаты численных расчетов. В таблицах 4 - 6 приведены сведения о числах итераций (табл. 4), о времени расчета (табл. 5) и о времени на одну итерацию (табл. 6).

Таблица 4. Число итераций для различных версий пакета OpenFOAM

Версия пакета	OF6	OF7	OF8	OF9	OF10
Без учета радиации	1846	1846	1848	1848	1844
С учетом радиации, модель fvDOM	914	914	914	1109	1109
С учетом радиации, Модель P1	901	901	2346	852	849

Таблица 5. Время расчета для различных версий пакета OpenFOAM

Версия пакета	OF6	OF7	OF8	OF9	OF10
Без учета радиации	680.25	746	664.26	1085	773.044
С учетом радиации, модель fvDOM	856.34	946.27	1099	1151.49	948.514
С учетом радиации, Модель P1	409.7	445.04	1383	429.23	369.35

Среды использованных различных версий пакета OpenFOAM с двумя моделями радиационного теплопереноса P1 и fvDOM, самой экономичной, по затраченному на одну итерацию времени оказалась версия OF10, а версия OF8 в случае использования модели fvDOM дает высокое значение времени на одну итерацию 1.202 с (см. табл.6).

Таблица 6. Время на одну итерацию для различных версий пакета OpenFOAM в секундах

Версия пакета	OF6	OF7	OF8	OF9	OF10
Без учета радиации	0.368	0.404	0.359	0.057	0.419
С учетом радиации, модель fvDOM	0.937	1.035	1.202	1.038	0.855
С учетом радиации, Модель P1	0.455	0.494	0.590	0.504	0.435

В свою очередь согласно численным данным версии OF8, при отсутствии радиации, время на одну итерацию составляет наименьшую величину 0.359с, а при использовании модели P1 это время равно 1.202с, что составляют наибольшее значение по сравнению с остальными версиями OpenFOAM. Это время на 28.66% процентов больше времени на одну итерацию 8.855с при использовании версии OF8.

На рисунке 3 приведено распределение средней температуры на боковых стенках для двух моделей радиационного излучения P1 (рис. 3а) и fvDOM (рис. 3б).

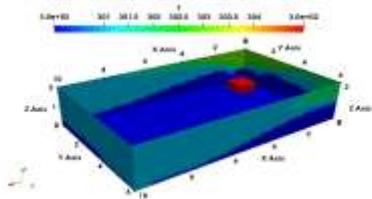


Рисунок 3.а - Распределение температуры без учета радиации

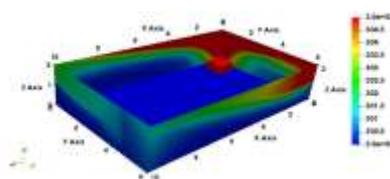


Рисунок 3.б - Распределение температуры для P1 модели радиации

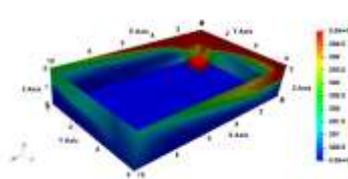


Рисунок 3.в - Распределение температуры для модели fvDOM модели радиации

Как видно из рисунка основное различие между двумя моделями имеет место в ближнем к нагревателю углу, что более четко видно на следующем рисунке 4аб, где представлено поле средней температуры в плоскости XOY при $z=0.25$ м.

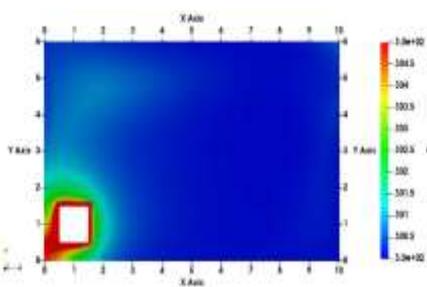


Рисунок 4.а - Распределение температуры для P1 модели радиации

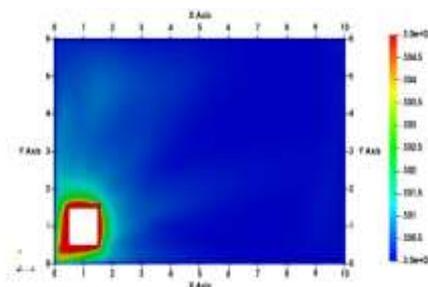


Рисунок 4.б - Распределение температуры для модели fvDOM модели радиации

Сказанное также видно из следующего рисунка 5аб, представляющий вертикальный профиль температуры вдоль линии, проходящей через точки с координатами (0.2 0.2 0) и (0.2 0.2 2).

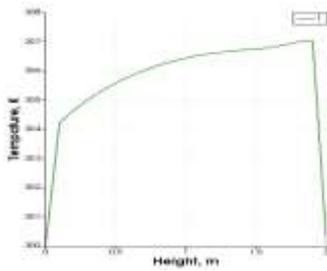


Рисунок 5а - Вертикальный профиль температуры для P1 модели радиации

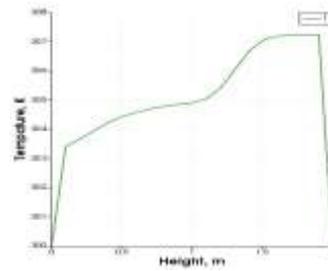


Рисунок 5б - Вертикальный профиль температуры для модели fvDOM модели радиации

Здесь виден горячий воздух, движущийся вверх, всего в нескольких сантиметрах от источника тепла температура падает с 500К почти до температуры окружающего воздуха или 300К. По этой причине использовалась шкала от 300 К до 320 К градусов. Распределения температуры и модуля скорости в плоскости $y=0.75\text{м}$ сильно различаются при использовании различных моделей излучения, что видно на следующих рисунках 6-9.

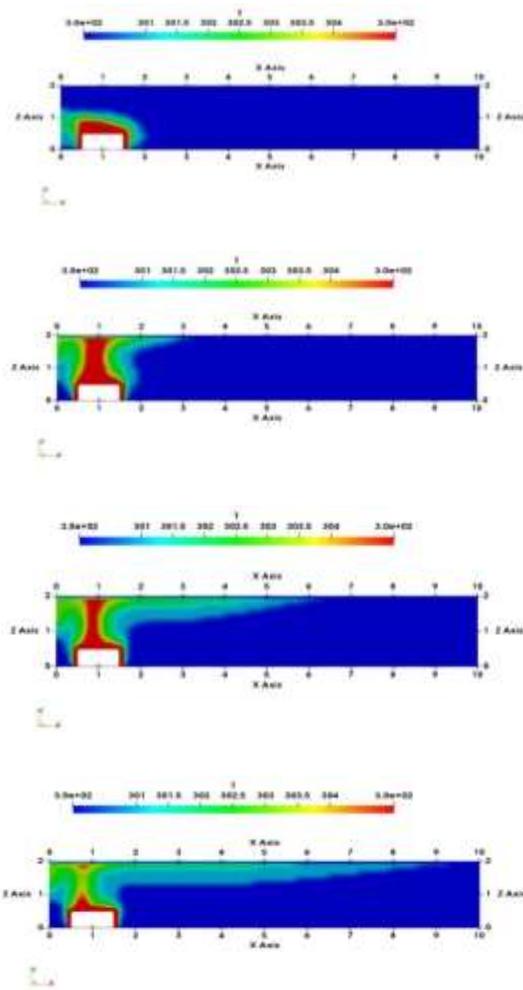


Рисунок 6 - Распределение средней

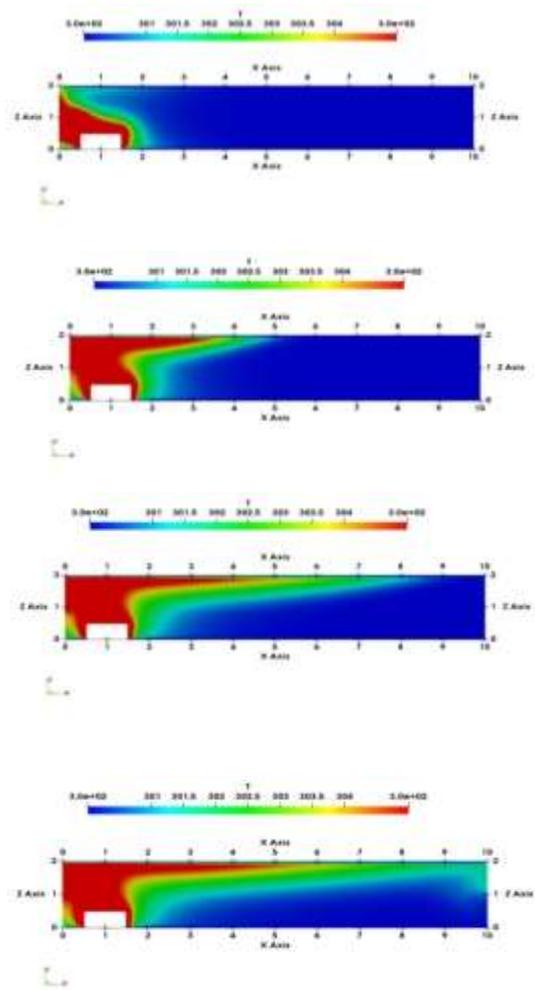


Рисунок 7 - Распределение средней

температуры без учета радиации

температуры с учетом радиации

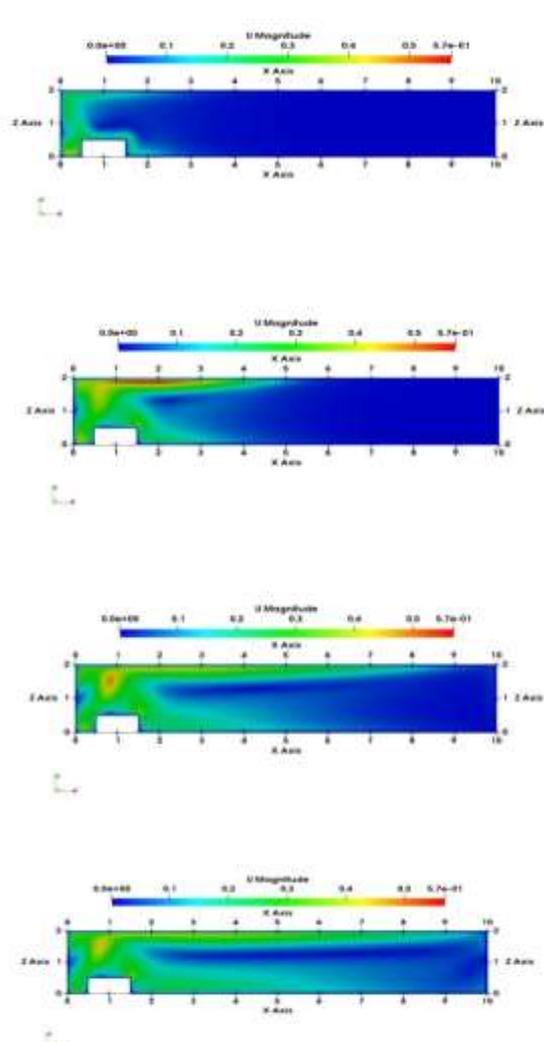
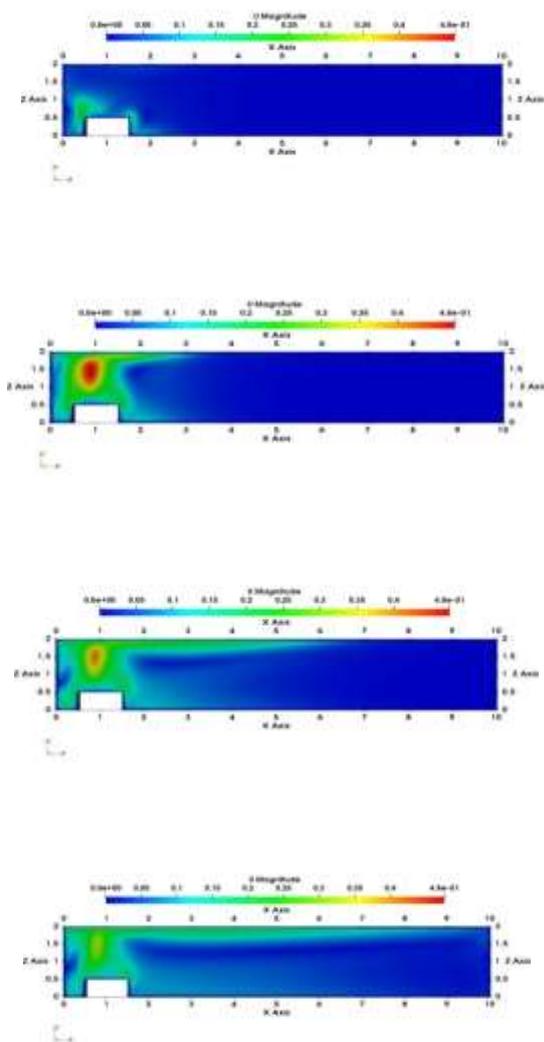


Рисунок 8 - Распределение модуля скорости с учетом без радиации

Рисунок 9 - Распределение модуля скорости с учетом радиации

В следующей табл. 7 приведены сведения о поля температуры в 4 рэперных точках P1,P2,P3 и P4 координаты которых равны (1.0 1.0 1.0), (9.0 1.0 1.0), (9.0 5.0 1.0), (1.0 5.0 1.0) соответственно.

Таблица 7. Численные данные о температуры в 4 рэперных точках

Точки		P1	P2	P3	P4
OF6	Без радиации	304.169	300.535	300.56	300.342
	FvDOM модель	308.544	300.52	300.263	301.308
	P1 модель	308.104	300.609	300.319	301.949
OF7	Без радиации	304.169	300.535	300.56	300.342

	FvDOM модель	308.544	300.52	300.263	301.308
	P1 модель	308.104	300.609	300.319	301.949
OF8	Без радиации	304.176	300.545	300.57	300.354
	FvDOM модель	308.548	300.53	300.273	301.317
	P1 модель	308.817	300.396	300.391	300.477
OF9	Без радиации	304.2	300.5	300.6	300.4
	FvDOM модель	308.429	299.97	300.049	299.859
	P1 модель	308.606	300.698	300.492	301.976
OF10	Без радиации	304.155	300.541	300.566	300.352
	FvDOM модель	308.427	299.968	300.047	299.858
	P1 модель	308.607	300.692	300.478	301.977

Из этой таблицы видно, что влияние радиационного переноса на поле температуры заметно около точки P1, где разница в температуре с учетом и без учета радиации составляет около 4К. Соответствующая разница температуры в точке P4 равна около 1К. Радиационный перенос тепла в дальних точках P2 и P3 практически не влияет на поле распределения температуры.

Характерной особенностью рассмотренного случая является то, что существенное повышение температуры в модели комнаты имеет место около нагревателя. Температура в остальной части комнаты практически не меняется.

Далее, рассмотрен случай когда подогрев комнаты осуществляется через пол, размер которого составляет 10×6 м². Температура пола была равна 325К.

В таком случае распределения полей температуры и скорости сильно отличаются от рассмотренного выше случая. Сказанное хорошо видно из следующих рисунков 11-12, где представлены поля температуры и модуля скорости в плоскости $y=3$ м.

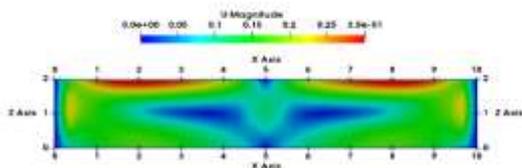


Рисунок 11 – Поле модуля скорости

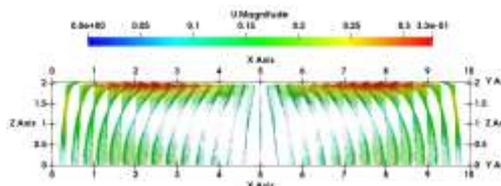


Рисунок 12 -Поле вектора скорости

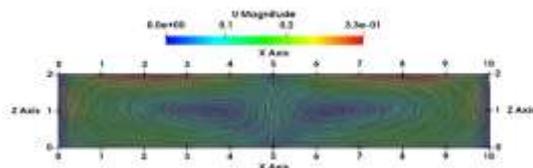


Рисунок 13-Изолинии модуля скорости

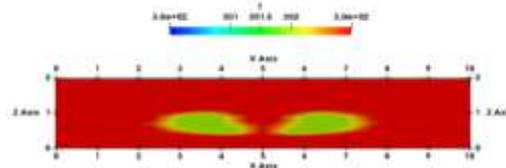


Рисунок 12 -Поле температуры

Сразу можно отметить образование двух симметричных, относительно линии $x=5\text{м}$ вихрей, вращающихся в двух противоположных направлениях (см. рис. 12). Поток воздуха поднимается вверх около крайних стенок $x=0$ и $x=10\text{м}$ и затем двигаются около потолка на встречу друг к другу. После взаимного соударения около линии $x=5\text{м}$ в центре комнаты поток идет вниз. По достижении пола комнаты поток воздуха разделяется на два вихря, которые направлены в противоположные стороны (см. рис. 13). В силу того, что почти весь объем воздуха комнаты вовлечен в конвективное движение, распределение температуры по комнате симметричное и равномерное, если не учесть небольшое уменьшение температуры в центрах двух симметричных вихрей (см. рис. 12). Таким образом, можно сказать, что процесс отопления комнаты через пол приводит к равномерному распределению температуры по всей комнате по сравнению с случаем, когда отопительная печь расположена в углу комнаты.

Заключение. Рассмотрена задача математического моделирования естественной конвекции в трехмерной модели помещения с источником отопления высотой 0.5 м, шириной 1 м и глубиной 1 м температура которого равна 500°К . Температуры пола, потолка и боковых стенок комнаты были равны 300°К . Математическую основу моделирования составляют осредненные по Рейнольдсу трехмерные стационарные уравнений Навье-Стокса, дополненные соответствующими уравнениями. Стандартный решатель buoyantSimpleFoam открытого пакета OpenFOAM был использован для математического моделирования с учетом различных моделей радиационного излучения.

Расчеты показывают, что среды использованных различных версий пакета OpenFOAM с двумя моделями радиационного теплопереноса P1 и fvDOM, самой экономичной, по затраченному на одну итерацию времени оказалась версия OF10, а версия OF8 в случае использования модели fvDOM дает высокое значение времени на одну итерацию 1.202 с.

В свою очередь согласно численным данным версии OF8, при отсутствии радиации, время на одну итерацию составляет наименьшую величину 0.359с, а при использовании модели P1 это время равно 1.202с, что составляют наибольшие значение по сравнению с остальными версиями OpenFOAM. Это время на 28.66% процентов больше времени на одну итерацию 8.855с при использовании версии OF8.

При отоплении модели комнаты через пол, обнаружено образование двух симметричных относительно центра комнаты при $x=5\text{м}$, вращающихся в противоположные стороны вихрей в плоскости $y=3$. В силу того, что почти весь объем воздуха комнаты вовлечен в конвективное движение, распределение температуры по комнате симметричное и равномерное, если не учесть небольшое уменьшение температуры в центрах двух симметричных вихрей. Таким образом, можно сказать, что процесс отопления комнаты через пол приводит к равномерному распределению температуры по всей комнате по сравнению с случаем, когда отопительная печь расположена в углу комнаты.

Литература

1. **Саркисов, А. А.** Основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов / А. А. Саркисов, Л. Б. Гусев, Р. И. Калинин ; под общ. ред. акад. РАН А. А. Саркисова ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. - М. : Наука, 2008. - 397 с.
2. **Сотников, А.Г.** Автономные и специальные системы кондиционирования воздуха. Теория, оборудование, проектирование, испытание, эксплуатация. Издательство АТ Publishing. Санкт-Петербург, 2005 г. - 240 с.
3. **Шепелев И.А.** Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.; -Стройиздат, 1978 - 147 с.
4. **Лукутин Б.В.** Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 187 с.

5. **Куликова Л.В.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие для вузов / Л. В. Куликова, Ю. А. Меновщиков. - Алт. Гос. Техн. Ун-т им. И. И. Ползунова. Новосибирский гос. Аграрный ун-т. - Барнаул: АлтГТУ, 2005. - 365с.
6. **Андерсон, Д.** Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидродинамика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж., Таннехилл, Р. Плетчер. Т. 2. - М.: Мир, 1990.-392 с.
7. **Роуч, П.** Вычислительная гидродинамика. - М.: Мир, 1980. –616с.
8. OpenFOAM7 User guide [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>. Дата обращения 15.07.2020.
9. **Ferziger, J.H.,** Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric Berlin: Springer Verlag, 2002. – 423 p.
10. **Патанкар, С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152с.
11. **Versteeg H. K.,** Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Edinburg: Pearson Education Limited / H.K. Versteeg, W. Malalasekera. - 2007. - 517p.