

**Кыргызский государственный технический университет имени
И.Раззакова**

Кыргызско-Российский Славянский университет имени Б. Ельцина

Диссертационный совет Д 01.25.711

На правах рукописи
УДК:532.542.4

Абдимуталипова Зейнура Каныбековна

Численное моделирование струйных турбулентных течений

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек-2025

Диссертационная работа выполнена на кафедре Экспериментальной и теоретической физики Ошского государственного университета

Научный руководитель: **Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественных наук и математики Ошского государственного университета

Официальные оппоненты: **Бекетаева Асель Орозалиевна**, доктор физико-математических наук, доцент кафедры Математическое и компьютерное моделирование Казакского национального университета имени Аль-Фараби.

Исабеков Кубатбек Абдыкеримович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, информатики и технологии обучения Ыссыкульского государственного университета им К. Тыныстанова, г. Каракол

Ведущая организация: НАО "Казахский национальный исследовательский технический университет им.К.И.Сатпаева", Республика Казакстан, г. Алматы, 050043, ул. Сатпаева, 22.

Защита состоится «15» мая 2025 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 01.25.711 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при Кыргызском Государственном техническом университете им. И. Раззакова и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Ельцина по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, КГТУ им. И. Раззакова, малый актовый зал (МАЗ, аудитория 1/257). Ссылка доступа к видеоконференции защиты диссертации:

Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского Государственного технического университета им. И. Раззакова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66 и Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б.Ельцина по адресу: 720000, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская 44 и на сайте www.vak.kg.

Автореферат разослан «9» апреля 2025года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-
математических наук, доцент



Доталиева Ж.Ж.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время наиболее актуальным является принцип комплексного решения вопросов определения воздухообмена и расчета воздушораспределения на базе закономерностей струйных течений и приближенных математических моделей тепло–массообменных процессов механических вентилируемых больничных палат. Для определения закономерностей формирования скоростных и температурных полей в вентилируемом помещении на базе трёхмерных уравнений Навье-Стокса часто используются методы вычислительной гидродинамики в совокупности с мощными пакетами прикладных программ.

Основы теории турбулентных струй изложены в работах Абрамовича Г. Н. (2011), Белова И. А. (2001), Гиневского А. С. (1969), Купера Д. (1993), Фрика П. Г. (2003), Юна А. А. (2010), Свейна Б. (2019).

Проблемы оптимизации вентиляции и движения воздуха в инфекционных помещениях рассмотрены в работах учёных дальнего зарубежья: S. L. Miller (2021), T. L. Le (2022), Suhendi (2024), Вшивковой А. П. (2024), Hyung-Eun Park (2024), A. Lavrinenko (2025), Sudniks, R. (2025).

В данной работе изучено влияние выходного отрицательного граничного условия для давления на движения воздуха больничной палаты с учетом теплообмена. Вышеизложенные подтверждает актуальность диссертации.

Связь темы диссертации с научными программами или научно-исследовательскими работами. Работа выполнена на основе тематическому плану научно-исследовательских работ на кафедры экспериментальной и теоретической теории Института математики, физики, техники и информационных технологий ОшГУ.

Целью исследования является развитие метода моделирования струйных турбулентных течений в рамках прикладного пакета OpenFOAM на примере движения воздуха в помещении.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Проводить аналитический обзор существующих методов численного моделирования турбулентных струйных течений и определить возможных путей их дальнейшего усовершенствования.
- Проверить адекватности используемой математической модели путем численного моделирования пристеночной турбулентной струи.
- Моделировать влияния числа Рейнольдса падающей турбулентной импактной струи на охлаждение нагревательной пластины.
- Моделировать влияния интенсивности турбулентности входной струи на движение воздуха в модели помещения.
- Моделировать влияния отрицательного выходного граничного условия для давления на движение воздуха в модели инфекционной палаты с учетом теплообмена.

Научная новизна полученных результатов работы.

1. Получено подобие течений в моделях палат с размерами $3 \times 1 \times 1$ и $9 \times 3 \times 1$ в двух геометрически подобных вертикальных сечениях. Показано, соответствие между экспериментальными данными и численным расчётом для модели $k-\omega$ SST является наилучшим при интенсивности 5%.

2. Проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления на организацию движения воздуха в модели инфекционной палаты с отрицательным давлением. Установлено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при отрицательных значениях выходного давления модели инфекционной палаты -8Па и -16Па соответственно, по сравнению с нулевым выходным давлением.

3. Показано, что предложенная схема вентиляции инфекционной палаты с размещением неподвижных пациентов обеспечивает необходимый скоростной комфорт – скорость воздуха не превышает значения 0.2м/с.

Практическая значимость полученных результатов.

Полученные результаты данной диссертационной работы вносят определенный вклад в метод математического моделирования турбулентных струйных течений. Результаты исследования внедрены в деятельность инфекционного отделения Карасуйской территориальной больницы “Курманжан Датка”.

Также можно их использовать в учебном процессе в качестве специального курса для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов соответствующих специальностей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

- Результаты моделирования пристеночной струи и охлаждения нагревательной пластины.
- Результаты моделирования струйного течения в модели инфекционной палаты больницы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается: корректной постановкой задачи, обоснованным использованием методов математического моделирования и программирования, численных методов, достижений современной вычислительной системы, достаточным объемом проведенных вычислительных экспериментов и сравнением полученных численных результатов с соответствующими экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад соискателя.

Диссертация является результатом самостоятельных исследований, выполненных автором. Личный вклад автора состоит в выборе методов достижения поставленной цели, проведении исследований, анализе полученных результатов и формулировке выводов, публикации статей.

Апробация результатов исследований.

Полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы результаты докладывались на следующих международных, республиканских конференциях и семинарах:

- 8th Computational Methods in Systems and Software 2024, CoMeSySo 2024. Vsetin, Czech Republic, October 25-28, 2024.
- Международная практическая конференция «Вызовы науки», посвященная 75-летию проф., доктора Багдаулета Кенжалиева, Алматы, Казакстан, 15-16 ноября 2023 года.
- XXIV Международная научно-практическая конференция «Наука и образование: проблемы и перспективы» - Россия, Алтайский край, 15-апреля 2022 года.
- II Международная конференция ICMSIT-III 2022: Метрологическое обеспечение инновационных технологий. 3-5 марта 2022, Красноярск - Санкт-Петербург, Россия.
- IV Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в научно-техническом и образовательном пространстве», посвященной 20-летию юбилею Института новых информационных технологий КГУСТА им. Н.Исанова, 29 октября 2021года. Бишкек, Кыргызстан.
- Международная научная конференция «Информационные технологии и математическое моделирование в науке и горнотехническом образовании», посвященной 80-летию академика Национальной академии наук Кыргызской Республики, профессора, доктора физико-математических наук Жайнакова Аманбека, Кыргызстан, Бишкек, 06-08 октября 2021г.
- XIV, XV и XVII Международная Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем».Казакстан, Алматы, 30-31 июля 2018 года; Новосибирск, Россия, 2019 год, 2021г.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные результаты исследований опубликованы в 11 научных статьях и 2 авторских свидетельствах, в том числе в научных журналах за пределами Кыргызской Республики, которые входят в базы данных Scopus (1), РИНЦ (3), IF -0.173(1).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, практических рекомендаций, библиографии и приложений. Работа содержит 133 страниц текста, 38 рисунка, 17 таблиц, 72 библиографических ссылок и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы постановка исследуемой проблемы, цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы. Анализируются современные подходы в моделировании течений несжимаемой жидкости, их преимущества и недостатки. Кратко описаны структура и основное содержание диссертации по главам.

В главе 1— Обзор литературы проведён обзор литературы по современным методам моделирования движения воздуха в помещениях, основанным на использовании турбулентных струйных течений с учётом вынужденной конвекции и теплообмена.

В главе 2 — Методология и Методы исследования рассмотрены методы дискретизации обобщенного уравнения переноса для обобщенной переменной на основе метода контрольных объемов в рамках пакета OpenFOAM.

Объект исследования: струйное турбулентное течение.

Предметом исследования является численное моделирование влияния отрицательных граничных условий на движение воздуха в модели инфекционной палаты.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} \beta (T - T_{ref}) + \nabla \left(2\mu_{eff} D(\mathbf{u}) - \nabla \left(\frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) \right) \quad (2)$$

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

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT ; \mu_{eff} = \mu + \mu_t ; \mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon ; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = P_k - \rho \varepsilon + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tau) + \nabla(\mathbf{u} \tau) - \nabla \cdot \left(\frac{\rho \mu_{eff}}{\sigma_{eff}} \nabla \tau \right) = 1 \quad (7)$$

Входные граничные условия для скорости, температуры, давления и других величин определяются по возможности из эксперимента. Граничные условия для турбулентных характеристик течения задаются при помощи аппарата пристеночных функций, а полученные после дискретизации СЛАУ решаются алгоритмом PIMPLE(SIMPLE)(Launder and Spalding, 1974).

В главе 3—Численное моделирование струйных турбулентных течений. В этой главе приведены результаты собственных исследований.

Задача №1. Численное моделирование плоской турбулентной пристеночной струи. Цель данной задачи состоит в численном исследовании полей скорости турбулентной пристеночной струи.

Постановка задачи. В данной работе проведено математическое моделирование плоской турбулентной пристеночной струи. Проведено сравнение полученных численных расчетов с данными экспериментальной работы Eriksson, J.G., Karlsson, R.I., Persson, J. (1998), взятой из классической коллекционной базы данных турбулентных течений ERCOFTAC, случай 55. Схема моделируемой задачи и границы расчетной области, без сохранения масштаба приведено на рисунке 3.1.

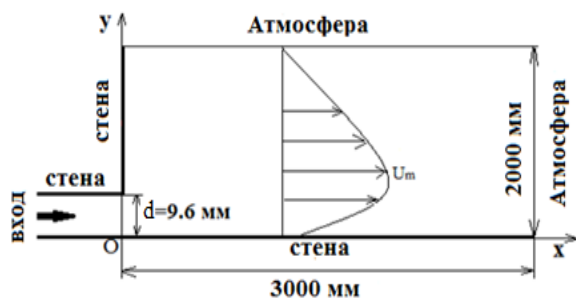


Рисунок 3.1-Геометрия задачи и границы области

Длина расчетной $l=3$ м, ширина 2 м и высота щели, из которой истекает плоская струя воды, равна 9.6мм. Число Рейнольдса, определяемое через среднее значение входной продольной скорости $U_o = 1$ м/с, коэффициента кинематической вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с и ширины щели $d=0.0096$ м равно $Re = \frac{U_o d}{\nu} = 9600$.

Численная модель. Для скорости на верхней границе, обозначенной на рисунке 3.1 «Атмосфера», задается условие `pressureInletOutletVelocity` с нулевым значением модуля скорости. Условие для давления задано в виде `totalPressure`, которое включает в себя динамическое давление. На стенках расчетной области для скорости задано условие прилипания (скорость равна 0м/с, что определяется в пакете OpenFOAM граничным условием `noSlip`), для давления задается условие нулевого градиента. Так как задача является двумерной, для передней «front» и задней «back» границ используется специальное граничное условие OpenFOAM «empty».

Значение кинетической энергии турбулентности на входе равна $k_{inlet} = 1.5(u')^2 = 0.00015$ м²/с², $\omega_{inlet} = \frac{\epsilon_{inlet}}{k_{inlet}} = 2.08$ с⁻¹ и соответствующая скорость диссипации $\epsilon_{inlet} = (C_\mu)^{0.75} (k_{inlet})^{1.5} / L = 0.093$ м²/с³, где L – турбулентный масштаб длины, принимаемый равным высоте щели.

Результаты численных расчетов и обсуждение. На рисунке 3.2 показано поля модуля скорости U в разные моменты времени t полученные с помощью пакета Paraview. Поле вектора скорости не одинаково. Если в момент времени 4с струя достигает до точки 1.5 м, то в момент времени 6с струя достигает до $x=1.7$ м

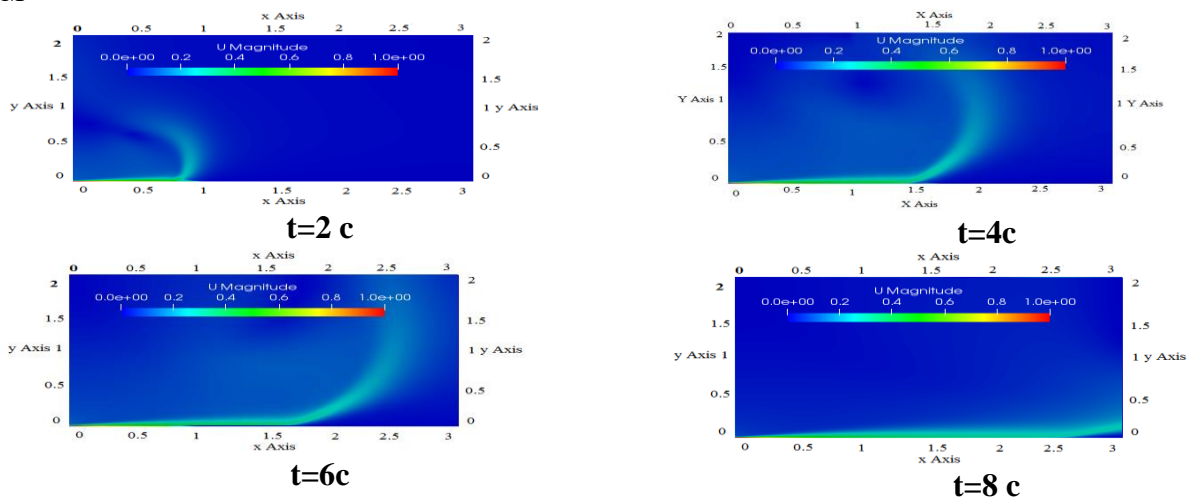


Рисунок 3.2- Поля модуля скорости в разные моменты времени

Сравнение вертикальных профилей продольной скорости при разных восьми сечениях $x/d=0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 150$ вниз по потоку с соответствующими экспериментальными данными приведено на рисунках 3.3.

На этих рисунках маркеры соответствуют экспериментальным данным работы Eriksson J; Karlsson R.I; Persson J(1998), сплошная линия - численные результаты данной работы.

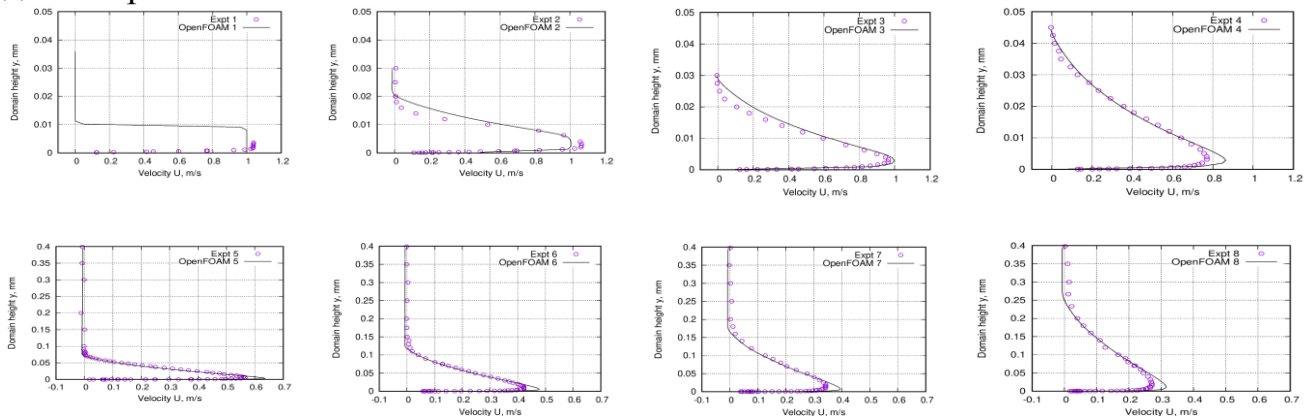


Рисунок 3.3-Вертикальные профили продольной скорости в разных сечениях

Как видно на рисунке 3.4, соответствие между расчётными и экспериментальными данными по поперечным профилям продольной скорости можно признать достаточно хорошим. До сечения $x=0.048\text{м}$, максимальная скорость в расчетах занижена на 8%. В сечении $x=0.096\text{м}$ соответствие хорошее, а далее вниз по течению расчет дает завышенные значения продольной скорости в пределах 9%-13%.

На рисунке 3.5 показан продольный профиль изменения максимальной скорости пристеночной струи в различных сечениях вниз по потоку. Расхождение между результатом численных расчётов и соответствующими экспериментальными данными по максимальной скорости пристеночной струи составляет примерно 5%.

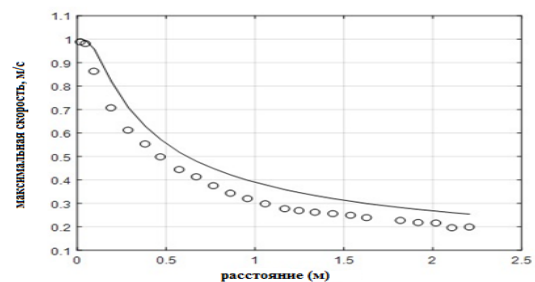


Рисунок 3.5-Продольный профиль максимальной скорости пристеночной струи

Задача №2. Численное моделирование охлаждения нагревательной пластины импактной струей. Целью данной задачи является изучение влияния числа Рейнольдса падающей турбулентной струи воздуха на процесс охлаждения. При этом важным аспектом диссертационной работы является вопрос, проверки адекватности математической модели процесса теплообмена между нагретой пластиной и струей воздуха.

Постановка задачи. Схема моделируемой задачи и границы расчётной области приведены на рисунке 3.6 и соответствует геометрии экспериментальной работы E. Baydar, Y. Ozmen (2006). Воздушная струя при температуре 306K втекает в квадратную рабочую область с размером $120\text{мм} \times 120\text{мм}$ через круглую трубу с внутренним диаметром отверстия 10мм со скоростью 39м/с, что соответствует числу Рейнольдса 24000.

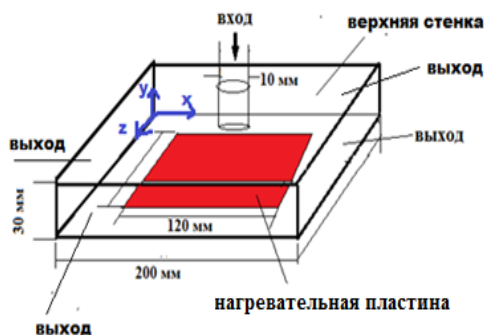


Рисунок 3.6 - Геометрия расчетной области

Математическая модель. Рассматриваемая задача основана на уравнениях (3.1-3.4) без учета производных по времени. Учет влияния турбулентных пульсаций на среднюю скорость потока осуществлялся с использованием моделей турбулентности *buoyantkEpsilon*, *kEpsilon*, *kOmega*, *kOmegaSST* и *RNGkEpsilon*.

Численная модель. По условию эксперимента круглая струя подается через вертикальную трубу со скоростью 39 м/с, а после удара от нагретой пластины выходит из расчетной области через 4 боковые грани области. Интенсивность турбулентности была установлена равной 5% для всех вариантов расчетов. Перед экспериментом стояла задача охлаждения нагревательной пластины, которая производит постоянный равномерный тепловой поток мощностью 3472.22 Вт/м². Для вычисления постоянного градиента вспомним связь между тепловым потоком и градиентом температуры: $q = \lambda \cdot |\nabla T|$, где λ – коэффициент теплопроводности алюминия. Откуда $\nabla T = q / \lambda = 3472.22 / 0.02699298 = 128634.09$ К/м. На входе и выходе заданы фиксированные значения температуры, а остальных трех стенках условие *zeroGradient*, что физически означает отсутствие теплообмена через них – условие адиабатичности стенок.

Для исследования эффекта насыщения расчетной сетки расчеты были проведены для 5 разных сеток, с разными числами контрольных объемов: 368672, 556470, 830320, 1 261 230 и 1 856 720. Из использованных 5 сеток, по времени вычислений и приемлемой точности численных решений, наиболее подходящей оказалась расчётная сетка с общим числом 1 261 230 ячеек, и представленные ниже численные результаты соответствуют именно этой расчётной сетке.

Результаты численных расчетов и обсуждение. Достоверность полученных числовых значений поля температуры проверяется двумя способами. Первое, проверкой условия симметричности профилей температуры на средней высоте рабочей области – в силу симметричной постановки задачи соответствующие профили температуры должны быть симметричными относительно точки $x=0.1$ м.

На рис. 3.7 показано изменение температуры вдоль линии на средней высоте, параллельной оси Oх, соединяющая точки с координатами (0, 0.015, 0.1) и (0.2, 0.015, 0.1) при различных значениях (13 м/с, 26 м/с, 39 м/с) числах Рейнольдса падающей турбулентной струи 8000, 16000, 24000.

Для достижения цели этой задачи, были рассмотрены следующие значения скорости падающей струи – 13 м/с, 19.5 м/с, 26 м/с, 39 м/с, 52 м/с, 58.5 м/с, 78 м/с, что соответствуют числам Рейнольдса 8000, 12000, 16000, 24000, 32000, 36000, 48 000.

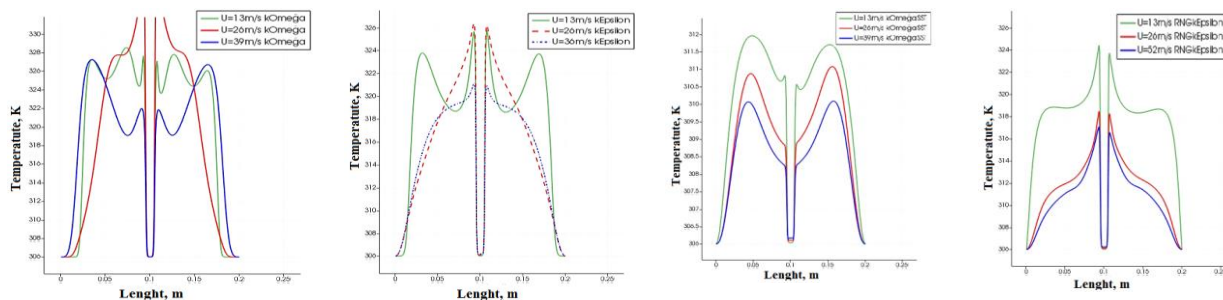


Рисунок 3.8 - Распределения поля скорости для разных моделей турбулентности

Видно, что точка с минимальной температурой $T=306\text{K}$ совпадает с зоной торможения струи. Струя, падая, на нагревательную пластину и отклоняется почти симметрично в обе стороны от точки $x=0.1\text{m}$, где образуется зона застоя. Это отчетливо заметно на рис. 3.9, где представлены изолинии модуля скорости в вертикальной плоскости при $z=0.1\text{m}$.

На этом рисунке видно образование двух симметричных относительно точки $x=0.1\text{m}$ вихрей, вращающих в двух противоположных направлениях, с центрами ($x \approx 0.035\text{m}$, $x \approx 0.165\text{m}$) расположенными примерно на расстоянии $x \approx 0.065\text{m}$ по обоим сторонам точки $x=0.1\text{m}$.

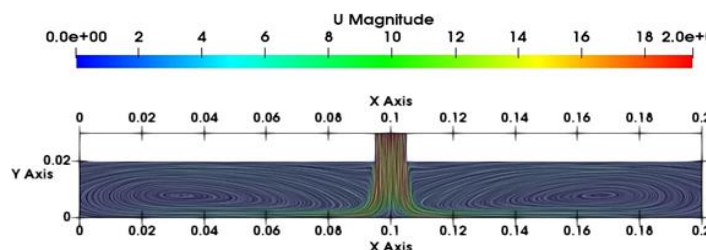


Рисунок 3.9 - Изолинии модуля скорости в плоскости $z=0.1\text{m}$

Во-вторых, достоверность полученных числовых значений поля температуры проверяется путем сопоставления с соответствующими экспериментальными данными. В таблице 3.6в. приведено сравнение численных значений температуры с экспериментальными данными, измеренными в 21 точке на поверхности нагревательной пластины (при $y=0$) для рассмотренных пяти моделей турбулентности – buoyantkEpsilon, kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG для значения числа Рейнольдса $Re = 24\,000$.

Таблица 3.6.в – Относительные ошибки сравнения температуры

№	Эксперимент	buoyantkEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	kEpsilonRNG
1	384.072	0.78839384	0.78891458	1.30756733	1.736393	3.159824
2	376.619	0.33004177	0.33774186	0.56157549	1.180238	0.187723
3	384.634	0.8077809	0.79088172	1.43071075	1.878149	2.628993
4	377.961	0.77759346	0.77759346	1.24748321	1.55016	1.664457
5	371.736	0.36719607	0.37230723	0.07693632	1.816612	0.372038
6	377.152	1.10194298	1.08842058	1.00834677	1.339513	1.605454
7	366.583	0.25887725	0.25996841	0.64514721	0.436463	0.190407
8	369.575	0.87641209	0.86829466	0.2316174	0.690793	0.625583
9	372.227	0.23990737	0.23480296	0.05587988	0.962316	0.496471
10	363.485	0.46962048	0.47072094	0.75766538	0.040442	0.203585
11	361.08	0.9493741	0.9493741	0.99617813	0.930819	0.759942
12	363.279	0.5257667	0.52439034	0.83186752	0.098547	0.255726
13	372.369	0.19469934	0.195505	0.05397871	0.99874	0.572282
14	370.473	0.62379715	0.6318949	0.05047601	0.929892	0.385723
15	365.941	0.42793784	0.42875764	0.82936867	0.259331	0.023228
16	377.982	0.86644338	0.87993608	1.24212264	1.553778	1.375462

17	372.365	0.19658131	0.19577565	0.07304661	0.995797	0.567454
18	377.741	0.83814042	0.83814042	1.15634787	1.489116	1.571977
19	384.456	0.81855921	0.834946	1.39573839	1.831679	2.681451
20	376.37	0.40252943	0.40093525	0.47479874	1.115657	0.170843
21	384.017	0.83303604	0.83173401	1.27416234	1.717111	2.937891
Средняя ошибка		0.604506	0.604811	0.747667	1.121502	1.068405

Из данной таблицы 3.6в. видно, что, вопреки утверждениям N. Zuckerman, N. Lior (2006) о том, что среди существующих моделей турбулентности модель kOmegaSST является предпочтительной для расчётов теплопередачи при столкновении турбулентных струй с преградой, среди использованных моделей оказалась самой наилучшей buoyantkEpsilon, а наихудшей оказалась kOmegaSST модель турбулентности.

На основе проведённых систематических расчётов выявлено неравномерное распределение поля температуры воздуха на плоскости средней высоты рабочей области. Это подтверждается рис. 3.10, на котором представлено температурное поле на средней высоте расчетной области.

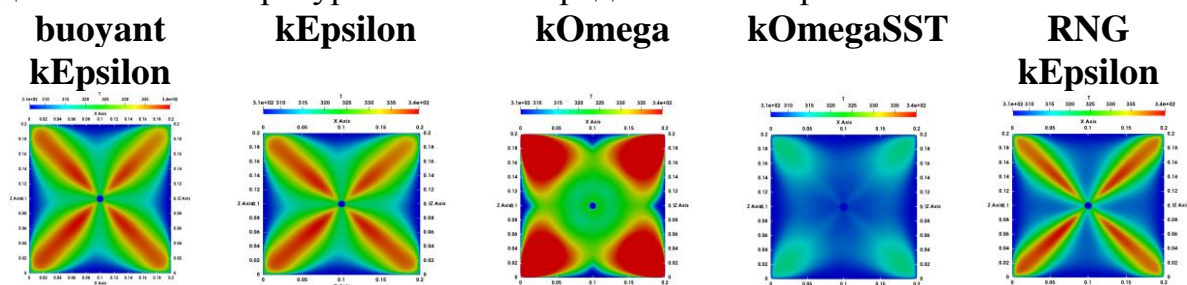


Рисунок 3.10-Распределение температурного поля на поверхности при входной скорости 39м/с

Из рассмотренных моделей четыре дают примерно одинаковое поле температуры, а kOmegaSST дает другой результат – завышенный теплообмен между нагревательной пластиной и струей.

Задача №3. Моделирование влияния интенсивности турбулентности входной струи на движение воздуха в модели помещения.

Целью данной задачи являются изучение влияния степени интенсивности турбулентности входной струи на поле течения в двух геометрически подобных моделях помещения с размерами 3м×1м×1м и 9м×3м×1м.

Постановка задачи. Рассматривается изотермическое движение воздуха, описываемое моделью газа с постоянными физическими свойствами: плотность $\rho = 1.204 \text{ кг/м}^3$, коэффициентами динамической $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и кинематической $\nu = 1.51 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ вязкостью. Турбулентный поток воздуха входит в модели помещения со скоростями $u_0 = 1.3 \text{ м/с}$ (рис. 3.11а) и $u_0 = 0.455 \text{ м/с}$ (рис. 3.11б).

Математическая модель задачи состоит из уравнений (3.1-3.2), которые дополняются соответствующими моделями турбулентности kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG.

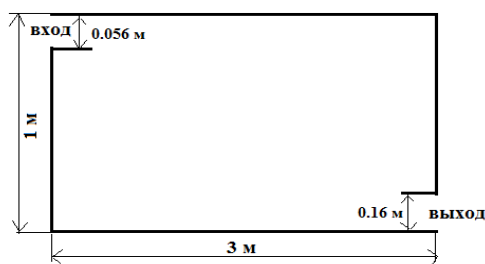


Рисунок 3.11а - Геометрия модели
3м×1м×1м

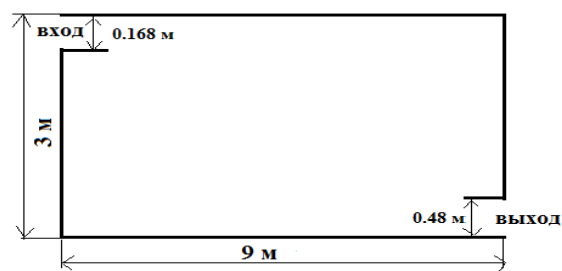


Рисунок 3.11б - Геометрия модели
9м×3м×1м

Высота первой модели $H=1\text{ м}$, в второй модели $H=3\text{ м}$, а длины моделей равны 3 м и 9 м соответственно. Высота входной щели, расположенной в левом верхнем углу расчетной области, равна $h = 0.056H$, высота выхода, расположенного около нижнего угла правой стенки, равен $0.16H$. Геометрические размеры расчетной области соответствует экспериментальной работе Restive A.M. (1979).

Результаты численных расчетов и обсуждение. Структура течения воздуха представлена на рисунке 3.12, на котором показаны изолинии модуля скорости для каждой турбулентной модели при одинаковых моментах времени. Сетка во всех трёх случаях одинакова, что позволяет объяснить разницу в потоке моделями турбулентности, используемыми для прогнозирования двумерного потока и интенсивности турбулентности при 1%, 5% и 10%.

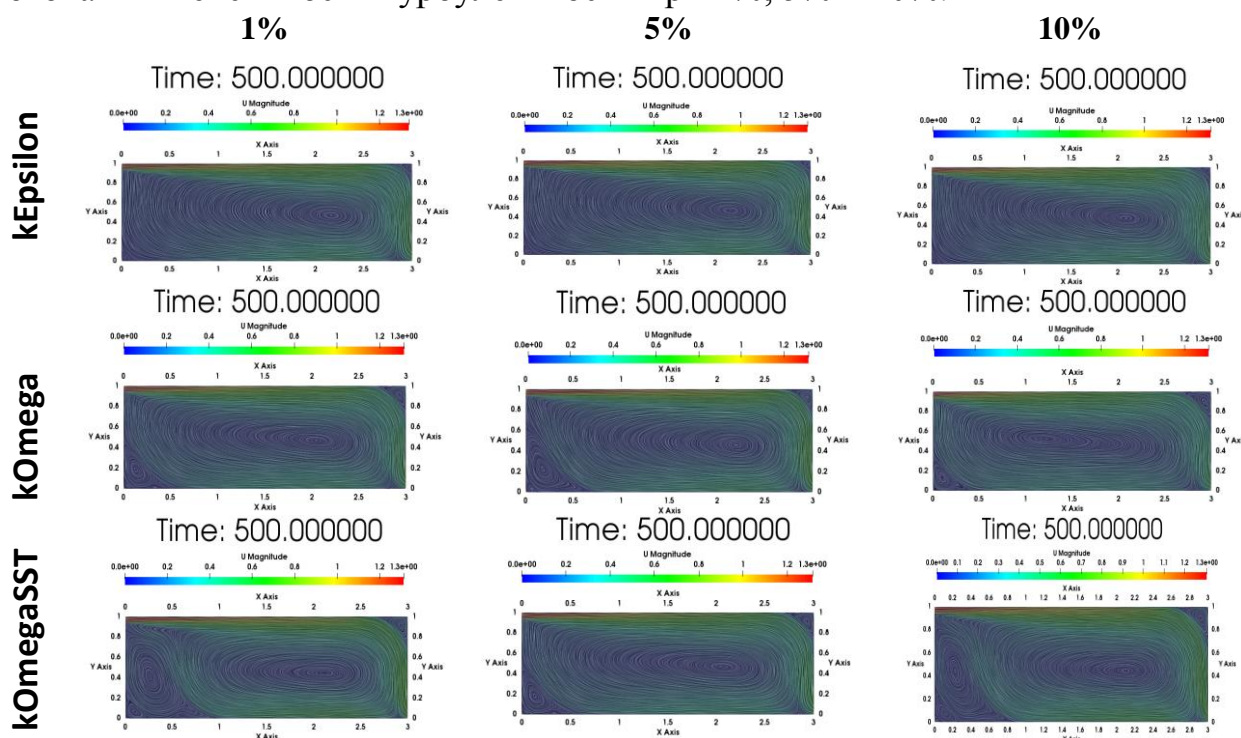


Рисунок 3.12 - Изолинии модуля скорости при разных моделях и при разных интенсивностях

На следующих рисунках показано сравнение вертикальных профилей продольной скорости в двух сечениях $x=1H$ (рис. 3.13) и $x=2H$ (рис. 3.14) при трех значениях интенсивности турбулентности входной струи.

kEpsilon

kOmegaSST

3x1
1H

9x3
1H

3x1
1H

9x3
1H

1%

5%

10%

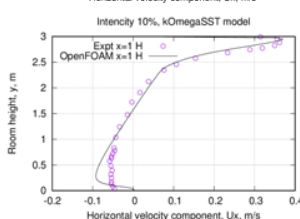
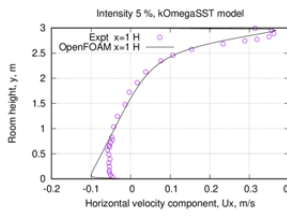
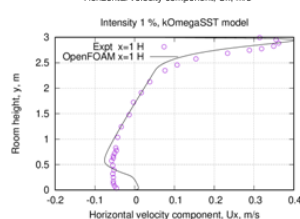
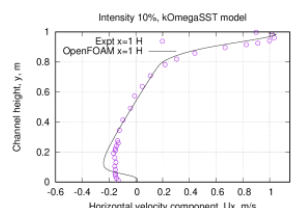
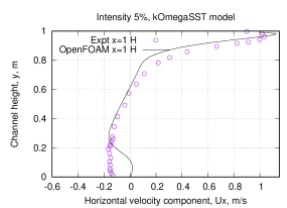
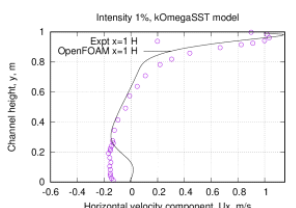
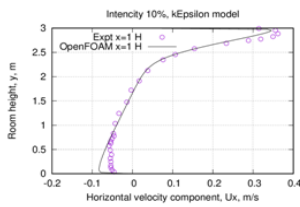
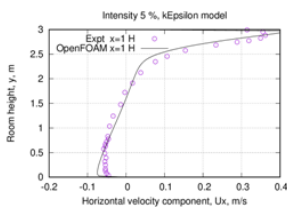
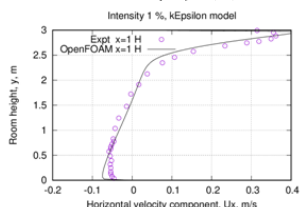
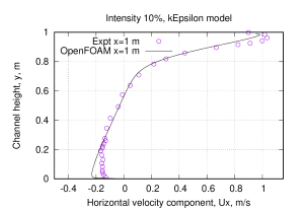
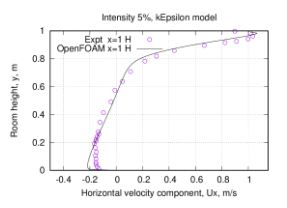
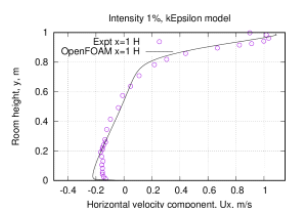


Рисунок 3.13 - Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=1H$

1%

5%

10%

kEpsilon

kOmegaSST

3x1
2H

9x3
2H

3x1
2H

9x3
2H

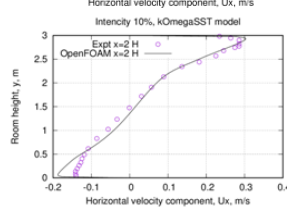
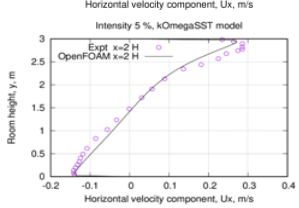
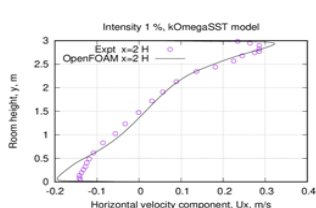
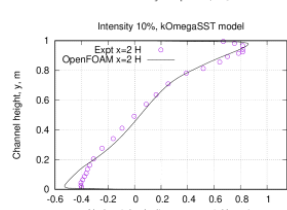
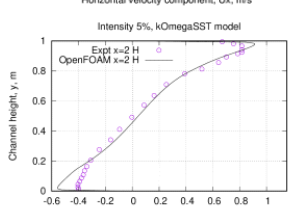
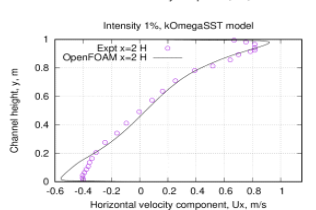
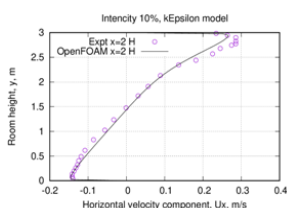
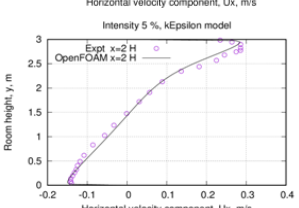
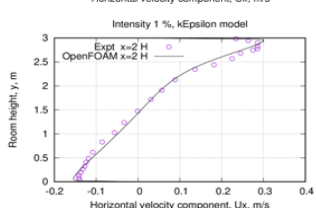
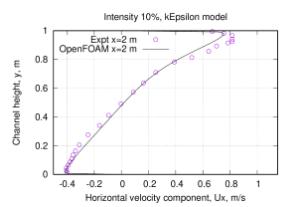
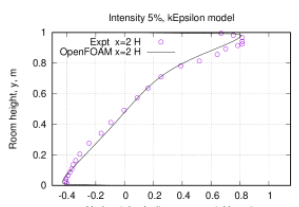
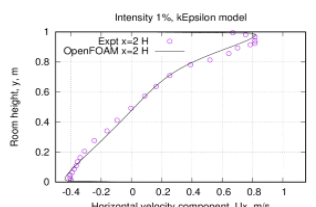


Рисунок 3.14 - Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=2H$

Соответствие между экспериментом и численным расчётом ухудшается при использовании модели k- ω SST при интенсивности 5%. В наших расчётах соответствующая погрешность составила 9.4%.

Задача №4. Численное моделирование возраста воздуха в помещении

Целью данной задачи является численное исследование влияния методов дискретизации конвективного члена в уравнении переноса импульса на качество воздушного потока в помещении.

Постановка задачи. Рассматривается задача моделирования движения воздушного потока в прямоугольной комнате размерами 4.2 м × 3.6 м × 3.0 м (рис.3.15). Приточное отверстие размером 0.3 м × 0.2 м расположено на левой стене, с нижним краем на высоте 2 м от пола. Центр прямоугольного входа расположен в точке с координатами (0, 1.8, 2.15) (см. рис.3.16, слева). Выходное отверстие прямоугольной формы расположено на потолке ближе к правой стенке и имеет размеры 0.3м×0.2м. Адекватность используемой математической модели и достоверность численных результатов проверяется путем сравнения с экспериментальными данными работы BatrakM. и др. (2001).

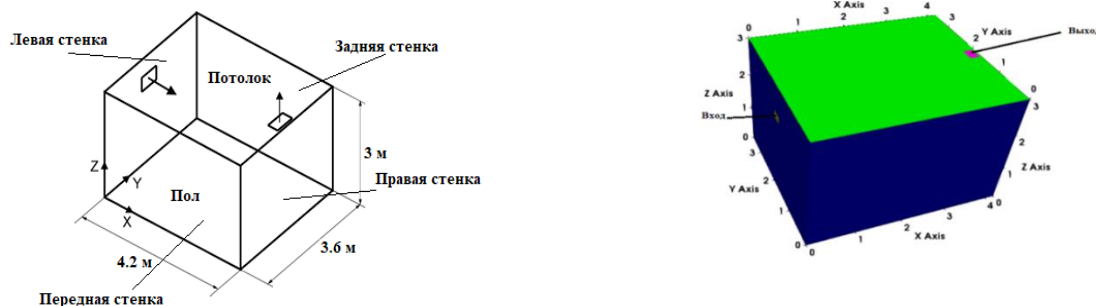


Рисунок 3.15-Гексаэдральная модель помещения (слева) и расчетная область (справа)

Средняя скорость подачи воздуха составляет 1.68 м/с, а его температура равна 23°C. Объемный расход воздуха поступающий в расчетную область, рассчитанный через входную скорость и площадь входа равен $Q = U_{in} * S = 1.68 * 0.3 * 0.2 = 0.1008 \text{ м}^3/\text{с}$. Объем расчетной области составляет 45.36м³.

Численная модель. Для исследования эффекта насыщения расчетной сетки расчеты были проведены для 4 разных сеток, с разными числами контрольных объемов: 210000, 420000 и 840000. Сравнение профилей модуля скорости для трех расчетных сеток приведены на рис.3.17.

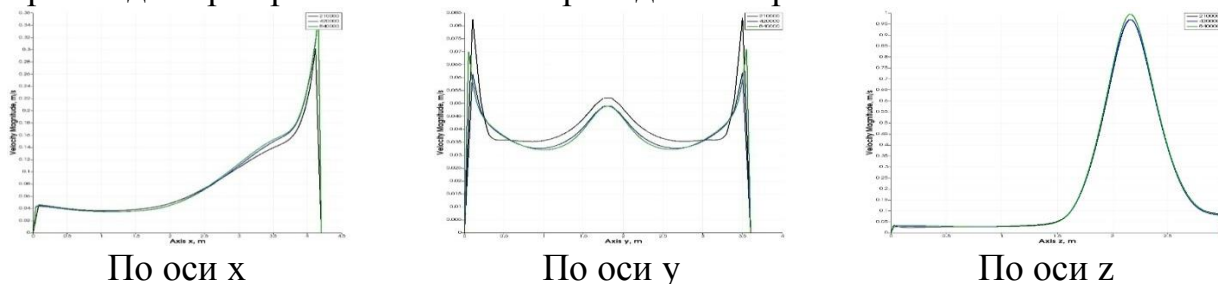


Рисунок 3.17- Сравнение профилей модуля скорости

Из трех использованных сеток, по времени вычислений и приемлемой точности численных решений, наиболее подходящей оказалась расчетная сетка с

общим числом 840 000 ячеек. Представленные ниже численные результаты соответствуют этой расчетной сетке.

Результаты численных расчетов и обсуждение. Сравнение результатов численного моделирования возраста воздуха с экспериментальными данными, представленными в таблице 3.12, показывает достаточно хорошее совпадение. Наименьшее расхождение наблюдается для двух схем дискретизации — Linear Upwind и QUICK, при этом относительная ошибка составляет около 12%. Наихудшей схемой в этой задаче является van Leer V, для которой относительная ошибка равна 19.96%. Все остальные схемы дискретизации обеспечивают примерно одинаковую точность порядка 13.5%, что косвенно указывает на достоверность полученных численных результатов и адекватность используемой математической модели.

Таблица 3.12.- Сравнение численного возраст воздуха с экспериментальными данными

	Experiment	Centered schemes			NVD		TVD schemes				Upwind convection schemes			
		cubic	linear	midPoint	Gamma	SFCD	limited Linear	minmod	MUSCL	vanLeerV	filtered Linear2	linear Upwind	QUICK	upwind
1	453.	472.70	472.70	472.70	474.09	474.73	476.3	475.61	473.94	611.90	472.70	486.41	486.41	611.90
средняя ошибка, %		13.506	13.506	13.506	13.364	13.305	13.18	13.204	13.47	19.961	13.506	11.943	11.943	16.851

Задача №5. Моделирование движения воздуха в модели инфекционной палаты

Цель данной задачи заключается в изучении влияния отрицательного выходного давления на поле скорости воздуха в модели инфекционной палаты размерами: длина — 6 м, ширина — 4 м, высота — 2.6 м (см. рис. 3.18 а,б).

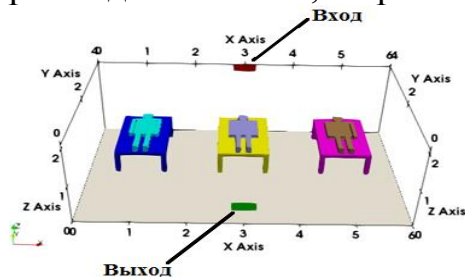


Рисунок 3.18 а - Модель инфекционной палаты с тремя пациентами

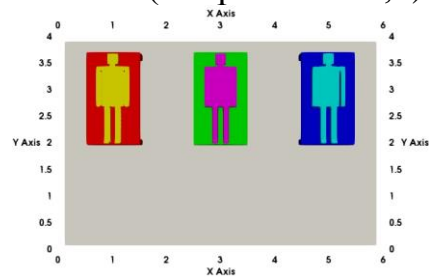


Рисунок 3.18 б - Схема расположения пациентов

Начало системы координат расположено в ближнем нижнем углу левой стенки. Входное и выходное отверстия имеют форму прямоугольника размерами 0.5м × 0.2м. Геометрический центр входного отверстия находится на задней стенке в точке с координатами (3, 4, 2.2), а центр выходного отверстия расположен на передней стенке в точке с координатами (3, 0, 0.5). Поток атмосферного воздуха, поступающего в расчётную область, имеет температуру 295.15 К.

Численная модель. Дискретизация уравнений, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии осуществлена методом контрольных объёмов. Теплообмен между телом пациента и окружающим воздушным потоком в палате осуществляется аналогично задаче 2 с использованием

граничного условия *externalWallHeatFluxTemperature* из пакета *OpenFOAM* при постоянном тепловом потоке мощностью 56.52 Вт/м².

Результаты численных расчетов и обсуждение. Поток атмосферного воздуха с температурой 295.15 К поступает через входное отверстие с заданной скоростью и выходит из модели инфекционной палаты через выходное отверстие, на котором установлено отрицательное давление. На рисунках 3.19–3.20 представлены поля векторов скорости для двух значений выходного давления модели палаты: $P_{out} = 0$ Па (рис.3.19) и $P_{out} = -4$ Па (рис. 3.20). Снижение граничного условия для давления с $P_{out} = 0$ Па до $P_{out} = -4$ Па приводит к существенным изменениям картины течения в модели палаты.

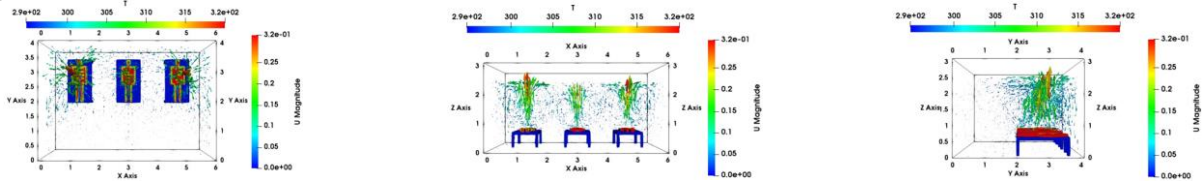


Рисунок 3.19 - Поле вектора скорости при давлении $P_{out} = 0$ Па в плоскости ХоУ (слева), ХоZ(в центре) и YoZ (справа)

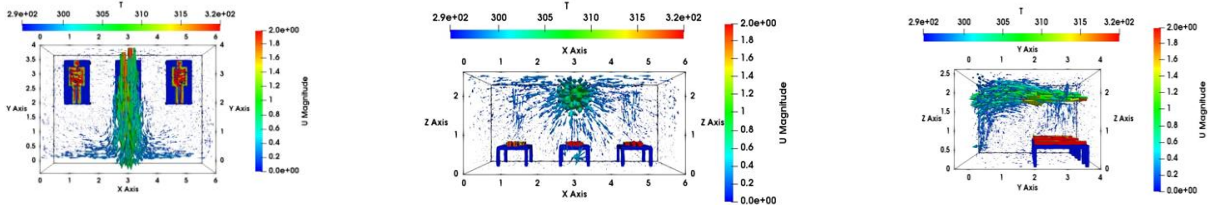
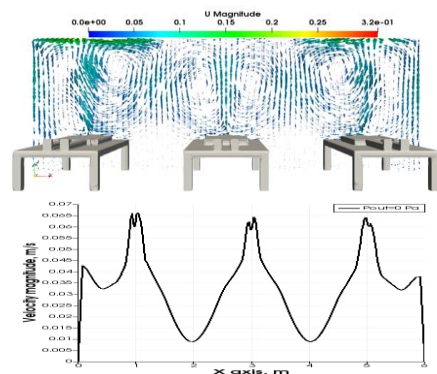
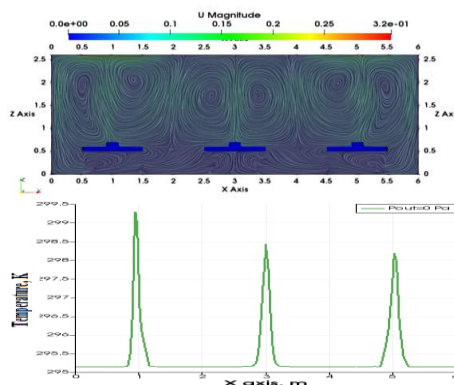


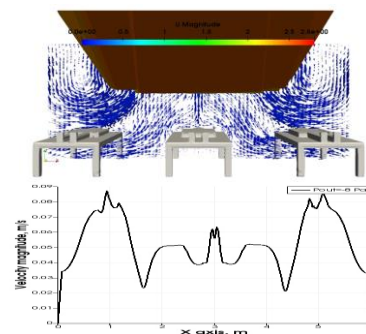
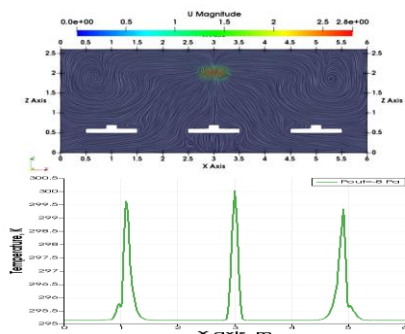
Рисунок 3.20 - Поле вектора скорости при давлении $P_{out} = -4$ Па в плоскости ХоУ (слева), ХоZ(в центре) и YoZ (справа)

Получен симметричный продольный профиль температуры и модуля средней скорости (вдоль оси Ох) с максимальной ошибкой 2.69% и 5.67% соответственно, что видно на рисунке 3.21. При $P_{out} = 0$ Па наблюдается образование конвективных ячеек Рэлей-Бенара.

$P_{out} = 0$ Па



$P_{out} = -8 \text{ Па}$



$P_{out} = -16 \text{ Па}$

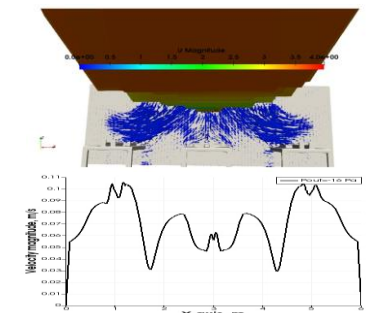
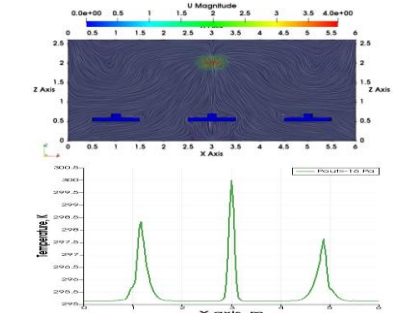


Рисунок 3.21-Изолинии и поле скорости, профили температуры и скорости

Сравнение этих графиков показывает смещение максимумов температуры потока около левых и правых стенок в сторону центральной части палаты по сравнению со случаем чистой свободной конвекции ($P=0 \text{ Па}$). При этом величина смещения увеличивается с ростом отрицательного выходного давления помещения. На рисунках 3.22–3.23 приведено сравнение результатов расчёта продольных профилей температуры и скорости для двух термодинамических моделей, где синий цвет соответствует внутренней энергии, а чёрный — энтальпии. Профили взяты вдоль горизонтальной линии, параллельной оси Ox и проходящей через геометрический центр палаты.

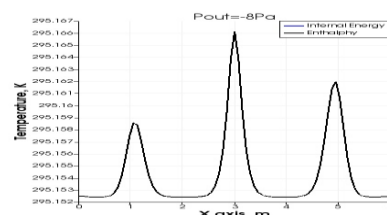
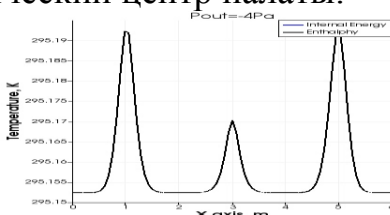
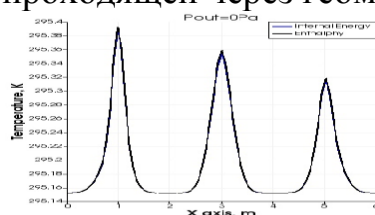


Рисунок 3.22-Профиль температуры при разных давлениях

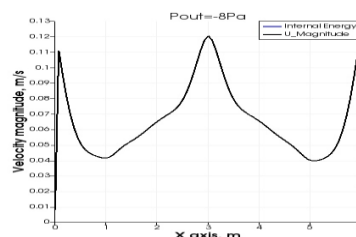
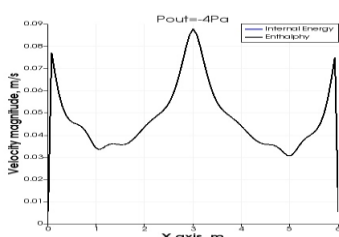
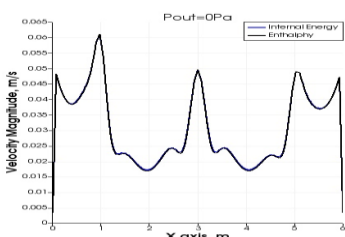


Рисунок 3.23 - Профиль модуля скорости при разных давлениях

Обнаружено, что уменьшение граничного условия для давления с $P_{out}=0 \text{ Па}$ до $P_{out}=-8 \text{ Па}$ приводит к существенным изменениям всей картины течения в модели палаты. Проведены численные расчеты с использованием двух термодинамических моделей для вычисления температуры воздушного потока в пакете OpenFOAM. Синий цвет соответствует внутренней энергии, а чёрный —

энтальпии. В целом совпадение между моделями достаточно хорошее, однако небольшие отличия, не превышающие 1.8%, наблюдаются в сечениях $x=0.5$ м, $x=2$ м, $x=4$ м и $x=5$ м.

Задача №6. Моделирование нестационарного движения воздуха в модели инфекционной палаты. Цель данной задачи заключается в изучении влияния выходного граничного давления на поле скорости нестационарного воздушного течения в модели инфекционной палаты размера $4 \times 4 \times 2.6$ м (см. рис. 3.27а,б).

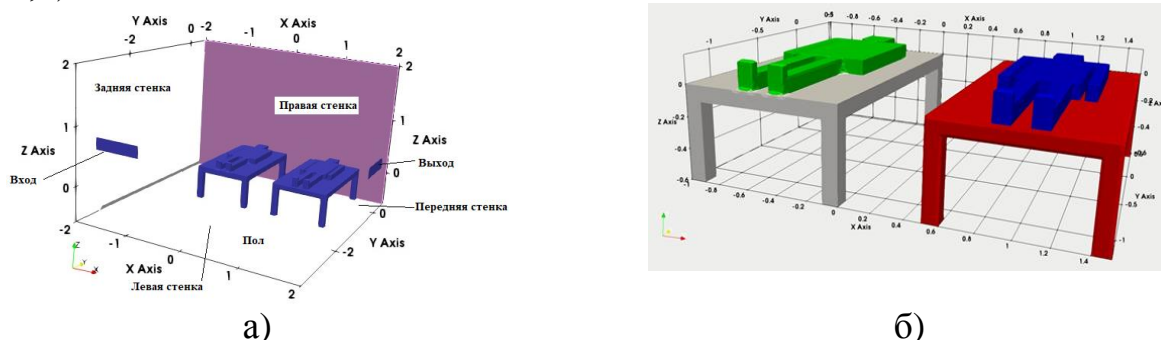


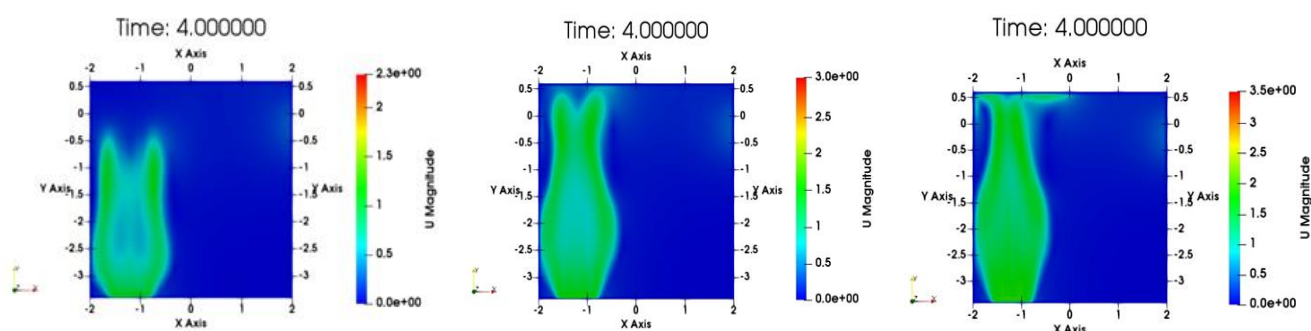
Рисунок 3.24 - Геометрия задачи (а) и пациенты с кроватью (б)

Постановка задачи. Входное и выходное отверстия имеют форму прямоугольника размерами $0.8 \text{ м} \times 0.2 \text{ м}$, а выходное отверстие расположено на правой стенке. Поток атмосферного воздуха, поступающего в расчётную область, имеет, температуру 295.15 К . Требуется определить качество нестационарного процесса вентиляции помещения путем сравнения полей модуля скорости и возраста воздуха в двух точках с координатами $(-0.5 \ 0.4 \ 0.1)$ и $(1.0 \ 0.4 \ 0.1)$, находящихся около лиц двух пациентов.

Математическая модель задачи. Основу модели составляют система уравнений (3.1-3.4) дополненная с уравнением (3.7).

Численная модель. Начальные значения полей модуля скорости и давления заданы равными нулю, температура потока в расчетной области равна 295.15 К . Значения давления на входе полагалось равным $4.5 \times 10^{-5} \text{ Па}$, а на выходе $4.5 \times 10^{-5} \text{ Па}$, -4 Па , -8 Па , -12 Па и -16 Па . Температура на входе 295.15 К , а на выходе, на кровати и на стенках помещения для температуры задано условие адиабатичности - отсутствие переноса тепла через границы. Граничные условие для температуры на поверхности пациента задается аналогично задаче-2, с учетом постоянного равномерного теплового потока мощностью 56.52 Вт/м^2 , выделяемый телом пациента в окружающий воздух помещения.

Результаты численных расчетов и обсуждение. Поле модуля скорости воздушно потока вдоль горизонтальной плоскости $z=0.7 \text{ м}$ приведены на следующих рисунках 3.25. Это плоскость проходит через нижний край входного отверстия. Здесь четко видно разделение нижнего края прямоугольной струи для значения давления на выходной границе в -4 Па .



Pout= - 4 Па.

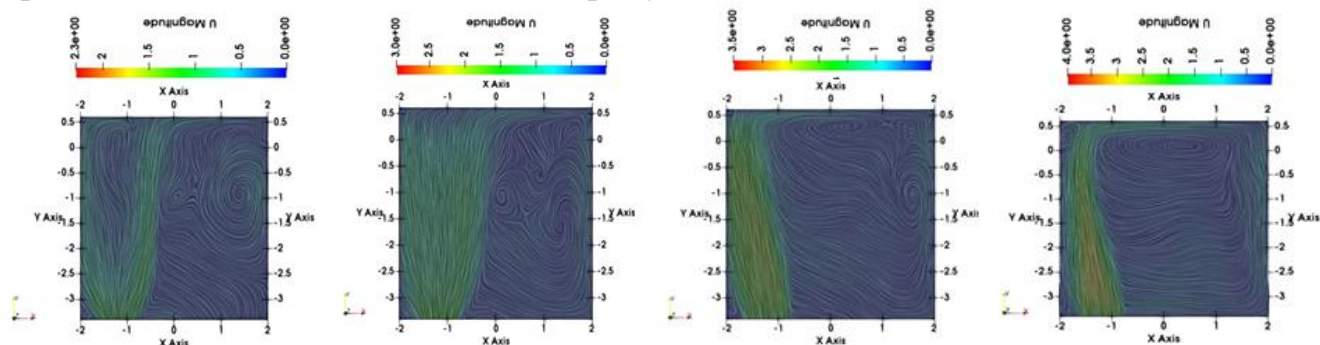
Pout= - 8 Па.

Pout= - 12 Па.

Рисунок 3.25 - Поле модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ при разных давлениях

Для случая, когда выходное давление модели инфекционной палаты равно -12Па , картина течения совсем другая – здесь отсутствует разделение переднего фронта нижнего края струи. Из-за относительно большой скорости струи, ее форма остается почти симметричной, что отчетливо показывает рис.3.28.

На следующих рисунках 3.26 отчетливо видны зоны рециркуляции, интенсивность которой растет с увеличением модуля отрицательного выходного граничного условия для давления модели инфекционной палаты, которая приводит к отклонению потока в сторону задней стенки помещения.



Pout=-4Па.

Pout=-8Па.

Pout=-12Па.

Pout=-16Па.

Рисунок 3.26- Изолинии модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ при разных давлениях

Обнаружено, что увеличение абсолютного значения отрицательного давления на выходе модели помещения в качестве граничного условия приводит к улучшению проветривания помещения. Однако, это в свою очередь приводит к росту модулю скорости больше чем 0.2 м/с , что вызывает появление ощущения сквозняка у пациентов

В **выводах** приведены полученные в диссертационной работе основные результаты.

В **приложении** приведены 2 акта внедрения, 2 свидетельства Кыргызпатента на программное приложение, 4 сертификата об участии в различных конференциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Получено подобие течений в моделях палат с размерами $3 \times 1 \times 1$ и $9 \times 3 \times 1$ в двух геометрически подобных вертикальных сечениях. Показано, соответствие между экспериментальными данными и численным расчётом для модели $k-\omega$ SST является наилучшим при интенсивности 5%.
2. Проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления на организацию движения воздуха в модели инфекционной палаты с отрицательным давлением. Установлено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24% при отрицательных значениях выходного давления модели инфекционной палаты -8Па и -16Па соответственно, по сравнению с нулевым выходным давлением.
3. Показано, что использованная схема вентиляции инфекционной палаты с размещением неподвижных пациентов обеспечивает, необходимый скоростной комфорт – скорость воздуха не превышает значения 0.2м/с, что соответствует требованиям международного стандарта эргономики помещений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Абдимуталипова З.К.** Имплементация пристеночных функций в пакете OpenFOAM. [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К., Полот кызы Гулмира. // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2018, стр. 103-106. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32795571>
2. **Абдимуталипова З.К.** Моделирование осесимметричного струйного течения [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы., Калбекова М.Ж., Сулайманова Г.К. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. 2018г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2018г. Ст:68-72. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37014603>
3. **Абдимуталипова З.К.** Моделирование методом крупных вихрей воздушно струйного теплообмена при умеренных числах Рейнольдса [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар. 2019г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2019г. Ст:3-9. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41540162>
4. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование нестационарного ламинарного обтекания кругового цилиндра. [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К., Марс кызы Таттыбүбү., Калмурзаева А.Т. // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2021, стр. 166-175. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46561758>

5. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование падающей из круглого сопла струи с использованием OpenFOAM [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем материалы XVII Международной Азиатской школы-семинара.2021г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий СО РАН 2021г. Ст:5-9. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-padayuschey-iz-kruglogo-sopla-strui-s-ispolzovaniem-openfoam>

6. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование сверхзвуковых струйных течений с использованием RANS и LES моделей [Текст] // Горный журнал, КГУ геологии, Бишкек, Кыргызстан, №2, 2021, стр. 9-12. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47387097>

7. **Абдимуталипова З.К.** О численном моделировании ударного струйного теплообмена [Текст] // Вестник Ошского государственного университета, Ош, Кыргызстан, №1, 2021, стр. 142-150. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46580155>

8. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование турбулентных струйных течений [Текст] // Вестник КГСТУА им. Н. Исанова. –2022.–№ 1(75). –с.197-201.– То же:[Электронный ресурс].–Режим доступа: <https://vestniksucta.kg/2022-2/>

9. **Abdimutalipova Z.K.** Numerical simulation of a flat turbulent near-wall jet in the OpenFOAMv7 package [Текст] Scopus: IOP Publishing Conference Series Journal of Physics: Conference APITECH III 2022. – Тоже: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/2/022019>

10. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование взаимодействия турбулентной падающей струи с вращающимся диском [Текст] // Наука и образование: проблемы и перспективы.– Бийск, –2022. № 1– стр.24-29. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www2.bigpi.biysk.ru/nir2016/file/kedbzit_15_09_2022_08_51_06.pdf

11. **Абдимуталипова З.К.** Программа для численного моделирования распространения пассивного скаляра в горизонтальном струйном течении [Текст] / Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К. // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №737, 15.03.2022. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>

12. **Абдимуталипова З.К.** Численное моделирование плоской турбулентной пристенной струи в пакете OpenFOAMv7 [Текст] / Абдимуталипова З.К., Курбаналиев А.Ы. // Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №738, 15.03.2022. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new2.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-62022.pdf>

13. **Abdimutalipova Z.K.** Numerical simulation of turbulent airflow in a room using the OpenFOAM package[Текст]//Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.Issue VI, –2023. pp. 145-150. <https://doi.org/10.31643/2023.17>

Абдимуталипова Зейнура Каныбековнанын «Струялык турбуленттик агымдарды сандык моделдештирүү» темасындагы 01.02.05- суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн жазылган диссертациясынын РЕЗЮМЕСИ

Ачкыч сөздөр: турбуленттүү агым, жылуулук өткөрүмдүүлүк, бөлмөдөгү терс басым, түшүү агымы, дубал агымы, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Изилдөөнүн объектиси: турбуленттүү струялык агым.

Изилдөөнүн предмети болуп оорукананын палатасында аргасыз конвекциянын таасиринин сандык изилдөөсү саналат.

Изилдөөнүн максаты бөлмө моделиндеги аба кыймылынын мисалын колдонуу менен OpenFOAM тиркеме пакетинин алкагында турбуленттүү струялык агымдарды моделдөө ыкмасын иштеп чыгуу болуп саналат.

Изилдөө ыкмалары. Турбуленттүү струялык агымдарды сүрөттөгөн стационардык жана стационардык эмес, Рейнольдс боюнча орточо алынган үч өлчөмдүү Навье-Стокс теңдемелеринин сандык интеграциясы.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы.

- $3 \times 1 \times 1$ жана $9 \times 3 \times 1$ өлчөмдүү бөлмөнүн моделдердеги агымдардын геометриялык жактан окшош эки вертикалдык кесилишинде окшоштугу алынды. k- ω SST модели үчүн эксперимент менен сандык эсептөөнүн ортосундагы дал келүүчүлүк 5% интенсивдүүлүктө эң начар экендиги көрсөтүлгөн.

- терс басымдагы инфекциялык палатанын моделинде абанын кыймылын уюштурууга басымга чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Инфекциялык палатанын моделинин чыгуу басымынын терс маанилеринде -8Па жана -16Па орточо ылдамдык профили нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтапка ылайыкталган жугуштуу оорулар бөлүмүнүн сунуш кылынган конструкциясы керектүү ылдамдыктын ыңгайлуулугун камсыздай турганы – абанын ылдамдыгы 0.2 м/с ашпаганы көрсөтүлгөн.

Колдонуу көлөмү же колдонуу боюнча сунуштар. Изилдөөнүн натыйжалары жылуулук алмашуу процесстерин эске алуу менен инфекциялык бөлмөнүн моделинде абанын кыймылын уюштуруу үчүн пайдаланылышы мүмкүн.

Колдонуу чөйрөсү. Изилдөөнүн натыйжалары терс басымдагы инфекциялык бөлүмдөрдүн моделинде абанын кыймылын оптималдаштыруу максатында Кара-Суу аймактык ооруканасынын жугуштуу оорулар бөлүмүнүн ишмердүүлүгүнө киргизүү үчүн сунушталышы мүмкүн.

РЕЗЮМЕ

диссертации Абдимуталиповой Зейнура Каныбековны на тему:
**«Численное моделирование струйных турбулентных течений» на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”**

Ключевые слова: Турбулентный поток, теплопроводность, отрицательное давление помещения, падающая струя, пристеночная струя, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Объект исследования: турбулентное струйное течения.

Предметом исследования является численное моделирование влияния отрицательных граничных условий на движение воздуха в модели инфекционной палаты.

Целью исследования является развитие метода моделирования струйных турбулентных течений в рамках прикладного пакета OpenFOAM на примере движения воздуха в помещении.

Методы исследования. Численное интегрирование осреднённых по Рейнольдса трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих струйные турбулентные течения.

Научная новизна полученных результатов работы.

- Получено подобие течений в моделях палат с размерами $3 \times 1 \times 1$ и $9 \times 3 \times 1$ в двух геометрически подобных вертикальных сечениях. Показано, соответствие между экспериментальными данными и численным расчётом для модели $k-\omega$ SST является наилучшим при интенсивности 5%.
- Проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления на организацию движения воздуха в модели инфекционной палаты с отрицательным давлением. Установлено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24% при отрицательных значениях выходного давления модели инфекционной палаты -8Па и -16Па соответственно, по сравнению с нулевым выходным давлением.
- Показано, что предложенная схема инфекционной палаты с размещением трёх пациентов обеспечивает необходимый скоростной комфорт – скорость воздуха не превышает значения 0.2м/с.

Степень использования или рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы для организации движения воздуха в модели инфекционной палаты с учетом процессов теплообмена.

Область применения. Результаты исследования могут быть предложены для внедрения в деятельности инфекционного отделения Карасуйской территориальной больницы с целью оптимизации движения воздуха в моделях инфекционных палат с отрицательным давлением.

SUMMARY

**dissertation of Abdimutalipova Zeynur Kanybekovna on the topic:
"Numerical modeling of turbulent jet flows" for the degree of candidate of
physical and mathematical sciences in the specialty 01.02.05 - "Mechanics of
liquids, gas and plasma".**

Key words: Turbulent flow, thermal conductivity, a negative pressure isolation space, falling jet, wall jet, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Object of study: turbulent jet flow.

The subject of the study is numerical modeling of the influence of negative boundary conditions on air movement in a model of an infectious diseases ward.

The purpose of the study is to develop a method for modeling turbulent jet flows within the framework of the OpenFOAM application package using the example of air movement in the infectious ward of the Karasu Territorial Hospital.

Research methods. Numerical integration of stationary and nonstationary, Reynolds-averaged three-dimensional Navier-Stokes equations describing turbulent jet flows.

Scientific novelty of the obtained results.

- The similarity of flows in chamber models with dimensions $3 \times 1 \times 1$ and $9 \times 3 \times 1$ in two geometrically similar vertical sections was obtained. It is shown that the agreement between experiment and numerical calculation for the $k-\omega$ SST model is worst at an intensity of 5%.
- Numerical modeling of the influence of the outlet boundary condition for pressure on the organization of air movement in a model of an infectious diseases ward with negative pressure was carried out. It was found that the average velocity profile increases by 6% and 24% at negative values of the outlet pressure of the infectious diseases ward model of -8 Pa and -16 Pa, respectively, compared to zero outlet pressure.
- It has been shown that the proposed design of an infectious diseases ward with accommodation for three patients provides the necessary speed comfort - the air speed does not exceed 0.2 m/s.

Extent of use or recommendations for use. The results of the study can be used to organize air movement in a model of an infectious disease ward, taking into account heat exchange processes.

Application area. The results of the study can be proposed for implementation in the activities of the infectious diseases department of the Karasuy territorial hospital in order to optimize air movement in models of infectious diseases wards with negative pressure.

