

**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:

Ведущая организация:

Защита состоится «__» ____ 20__ года в 14:00 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:

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 «__» ____ 20__ г.

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 воздухораспределения 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), Фрик П.Г.(2003), Юн А.А.(2010), Свейна Б.(2019).

Проблемы оптимизации вентиляции и движения воздуха в инфекционных помещениях рассмотрены в работах S. L. Miller (2021), T. L. Le (2022), Suhendi (2024), Вшивкова А.П.(2024), Nyung-Eun-Park(2024) и др.

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 личной инициативы соискателя.

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 совершенствования.
- 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- ω 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 постановке и определении цели работы, 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, 37 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:

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

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

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

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

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

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 пристенной 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 и расчетная сетка приведены на рисунке 3.1 и 3.2 соответственно.

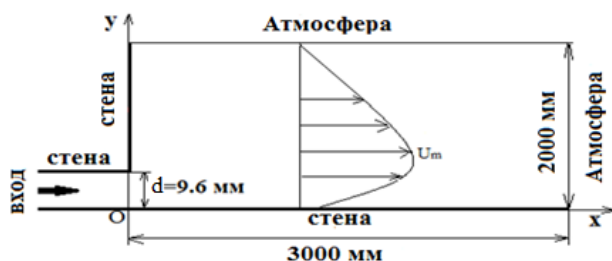


Рисунок 3.1 – Геометрия задачи и границы области

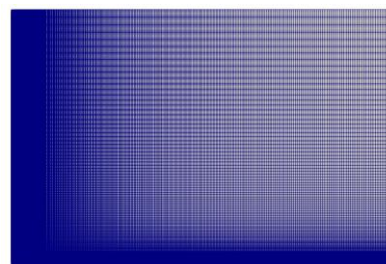


Рисунок 3.2 – Расчетная сетка

Длина расчетной $l=3$ м, ширина 2 м и высота щели, из которой втекает 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 $Re = \frac{U_o d}{\nu} = 9600$.

Математическая модель задачи основана на уравнениях (1-2), дополненных kOmegaSST моделью турбулентности.

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 включаетв 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». Это условие задается в случаях, когда вычисления в заданном направлении не проводятся.

Влияние турбулентности на течение жидкости – воды, внутри расчетной области учитывается посредством kOmegaSST модели турбулентности.

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.

Дискретизация расчетной области произведена методом контрольных объемов. Полученная в результате дискретизации уравнений (1-2) решения систем линейных алгебраических уравнений - СЛАУ решена при помощи алгоритма PISO до момента времени 8с с шагом 0.001с. Также была проведено расчёты с применением алгоритма SIMPLE с применением метода нижней релаксации. Коэффициенты нижней релаксации для давления - 0.2, для скорости - 0.5 и для остальных величин - 0.3.

Результаты численных расчетов и обсуждение. В эксперименте измерения проводились в разных значениях x вниз по потоку. Продольные координаты 8 сечений, в которых измерены профили скорости, в метрах, были равны $x=0.000$ м; 0.048м; 0.096м; 0.192м; 0.384м; 0.672м; 0.960м; 1.440м.

На рисунке 3.3 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.

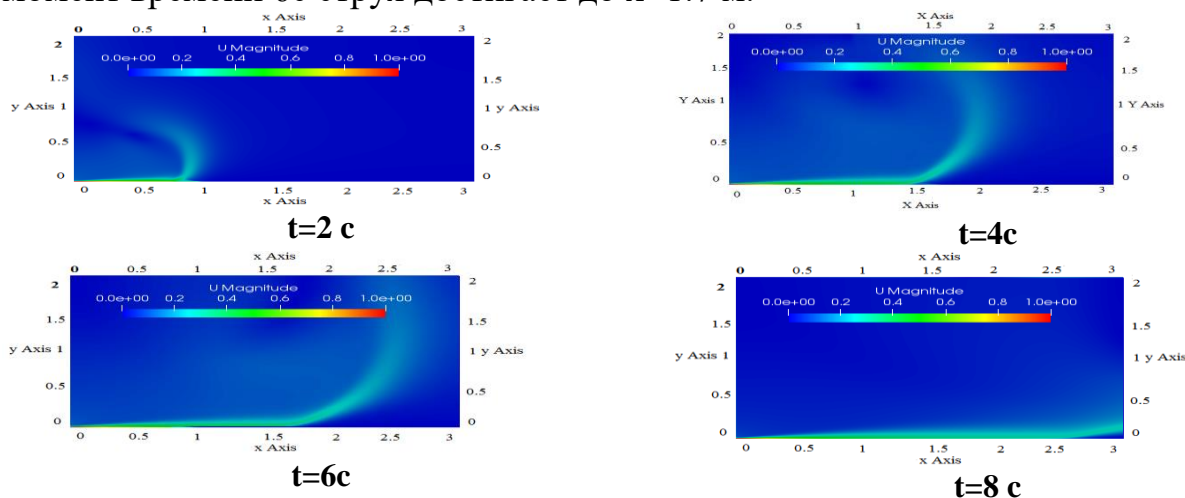


Рисунок 3.3– Поля модуля скорости

Сравнение вертикальных профилей продольной скорости (рис.3.4) и поперечной скорости (рис.3.5) при разных восьми сечениях $x/h=0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 150$ вниз по потоку с соответствующими экспериментальными данными приведено на рисунках 3.4-3.5. На этих рисунках маркеры соответствуют экспериментальным данным работы ErikssonJ; KarlssonR.I; PerssonJ(1998), сплошная линия - численные результаты данной работы.

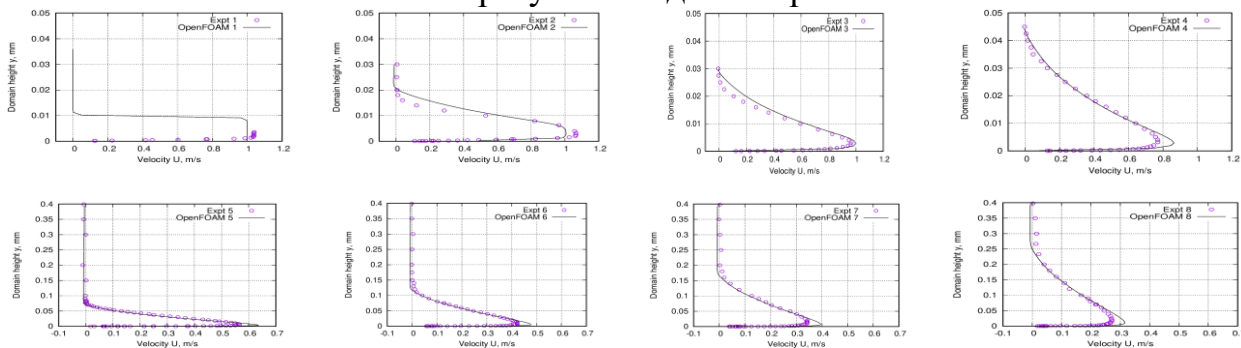


Рисунок 3.4– Вертикальные профили продольной скорости в разных сечениях

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

Это видно из таблицы 3.4, где представлены расхождения между результатами численных расчётов и соответствующими экспериментальными данными по поперечным профилям продольной скорости в восьми сечениях.

Таблица 3.4-Сравнение численных расчётов с экспериментальными данными.

1	2	3	4	5	6	7	8
x=0м	x=0.048м	x=0.096м	x=0.192м	x=0.384 м	x=0.672м	x=0.960м	x=1.440м
4.7%	8%	2%	13%	10%	9%	11%	10%

На рисунке 3.6 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%.

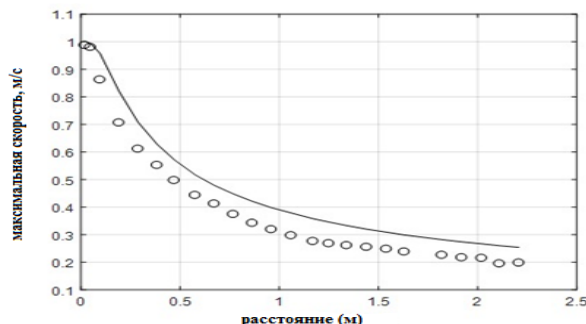


Рисунок 3.6—Продольный профиль максимальной скорости пристеночной струи

Таким образом, численное моделирование плоской турбулентной струи показало, что по вертикальным профилям продольной и поперечной составляющих скорости и продольному профилю максимальной скорости расхождение между численными и экспериментальными данными составляют порядка от 2% до 13% и 5% соответственно. Полученные результаты с достаточно высокой степенью точности указывают на то, что использованная математическая модель является достоверной и может применяться для моделирования движения воздуха в больничной палате струйным течением.

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 проверка адекватности математической модели процесса теплообмена между нагретой пластиной и струей воздуха.

Постановка задачи. Схема моделируемой задачи и границы расчётной области приведены на рисунке 3.7а и соответствует геометрии экспериментальной работы E. Baydar, Y. Ozmen (2006). Воздушная струя при температуре 306К втекает в квадратную рабочую область с размером 120мм×120мм через круглую трубу с внутренним диаметром отверстия 10мм со скоростью 39м/с, что соответствует числу Рейнольдса 24000. Алюминиевая нагревательная пластина расположена на расстоянии 20мм от выходного конца круглой трубы. Размеры нагревательной пластины равны 120мм×120мм. Ось симметрии круглой трубы проходит через геометрический центр нагревательной пластины. Использованная расчётная сетка в вертикальном разрезе при z=0.1м представлена на рис. 3.7б.

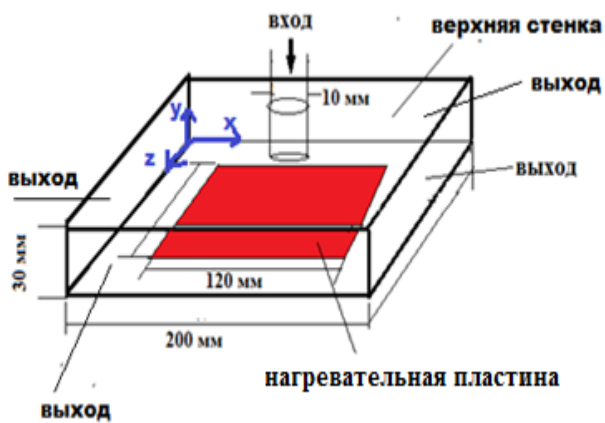


Рисунок 3.7а–Геометрия расчетной области

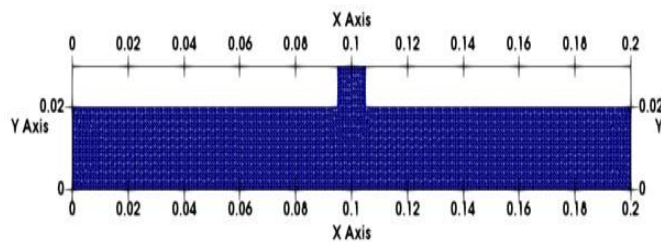


Рисунок 3.7б–Расчетная сетка

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

Математическая модель задачи основана на уравнениях (1-4) без учета временных производных. Учет влияния турбулентных пульсаций на среднее течение базировался на использовании buoyantkEpsilon , kEpsilon , kOmega , kOmegaSST , RNGkEpsilon моделей турбулентности.

Численная модель. По условию эксперимента круглая струя подается через вертикальную трубу со скоростью 39м/с, а после удара от нагретой пластины выходит из расчетной области через 4 боковые грани области. Для всех искомых величин, кроме температуры граничные условия задаются аналогично предыдущей задаче. Интенсивность турбулентности была установлена равной 5% для всех вариантов расчетов. Граничное условие для температуры на нагревательной пластине задаётся следующим образом.

Перед экспериментом стояла задача охлаждения нагревательной пластины, которая производит постоянный равномерный тепловой поток мощностью 3472.22 Вт/м². Для учёта граничного условия такого рода в пакете OpenFOAM предусмотрена возможность его задания при помощи постоянного градиента – fixedGradient . Для вычисления постоянного градиента вспомним связь между тепловым потоком и градиентом температуры: $q = \lambda \cdot |\nabla T|$, где λ – коэффициент теплопроводности алюминия. Откуда $\nabla T = q / \lambda = 3472.22 / 0.02699298 = 128634.09 \text{ К/м}$. На входе и выходе заданы фиксированные значения температуры, а остальных трех стенках условие zeroGradient , что физически означает отсутствие теплообмена через них – условие адиабатичности стенок. Дискретизация расчетной области произведена помощью метода контрольных объемов, а дискретизация уравнений выполнена аналогично предыдущей задаче.

Предполагается, что сходимость итераций с использованием процедуры SIMPLE достигается, когда значения погрешностей для давления и энтальпии становятся ниже 1×10^{-2} , а значения погрешностей для остальных величин (U, k, omega, epsilon) будут ниже 1×10^{-3} .

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. 3.8 показано изменение температуры вдоль линии на средней высоте, параллельной оси Ox , соединяющая точки с координатами $(0, 0.015, 0.1)$ и $(0.2, 0.015, 0.1)$ при различных значениях $(13\text{ м/с}, 26\text{ м/с}, 39\text{ м/с})$ числах Рейнольдса падающей турбулентной струи 8000, 16000, 24000.

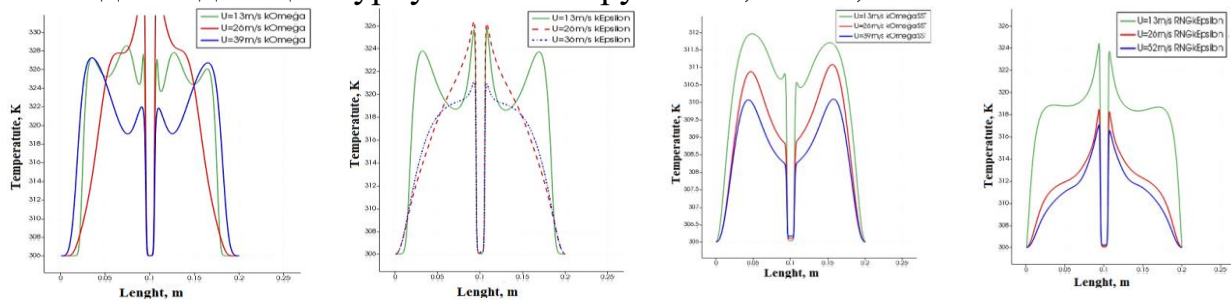


Рисунок 3.8–Распределения поля скорости для разных моделей турбулентности

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

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

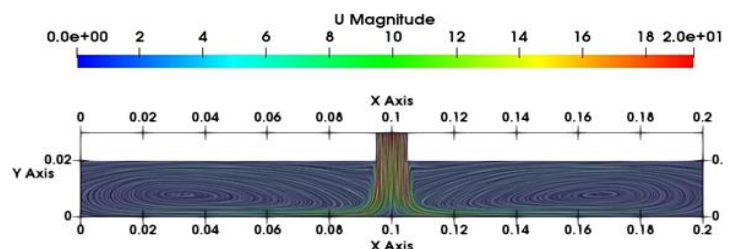


Рисунок 3.9 – Изолинии модуля скорости в плоскостиз=0.1 м

Из-за увеличения скорости движения струи в этой зоне скорость теплопередачи будет максимальной, потому что модуль градиента температуры около точки $x=0.1$ большая, что в свою очередь приводит к большему теплообмену в зоне застоя. По мере удаления по обеим сторонам зоны застоя

скорость теплопередачи от нагревательной пластины к воздуху постепенно уменьшается из-за уменьшения импульса струи.

Во-вторых, достоверность полученных числовых значений поля температуры проверяется путем сопоставления с соответствующими экспериментальными данными. В табл. 3.6б 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 3.6в–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.

Проведенные систематические расчёты (при одинаковой точности численных решений) для разных значений числа Рейнольдса падающей турбулентной струи показали, что с увеличением числа Рейнольдса от 8 000 до 48 000 время расчетов (см. табл. 3.7а) и число итераций (см. табл.3.7б) уменьшаются для всех 5 моделей турбулентности.

Таблица 3.7а– Время расчётов для разных числах Рейнольдса

Модели	buoyant kEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	RNGkEpsilon
--------	---------------------	----------	--------	-----------	-------------

Число Рейнольдса	Время расчета	Время расчета	Время расчета	Время расчета	Время расчета
8 000	5704	6054	4945	11405	11088
12 000	4870	4838	4089	4369	4879
16 000	4475	4419	3947	4270	4765
24 000	4257	4242	3418	4224	4751
32 000	4197	4106	3272	4215	4450
36 000	4122	4106	3266	4244	4423
48 000	4117	4122	3265	4414	4633
	27.82%	31.91%	33.97%	61.30%	58.21%

Здесь следует отметить, что для числа Рейнольдса 8 000 использование моделей kOmegaSST и RNGkEpsilon приводит к постоянному значению погрешности итераций примерно чуть больше чем заранее заданное малое число.

Таблица 3.7б– Число итераций для разных числах Рейнольдса

Модели	buoyant kEpsilon	kEpsilon	kOmega	kOmegaSST	RNGkEpsilon
Число Рейнольдса	Число итераций	Число итераций	Число итераций	Число итераций	Число итераций
8 000	1536	1536	1335	3000	3000
12 000	1320	1320	1091	1086	1330
16 000	1198	1198	1057	1051	1286
24 000	1154	1154	919	1037	1306
32 000	1136	1136	875	1043	1200
36 000	1116	1116	868	1047	1197
48 000	1107	1107	845	1061	1187
	27.93%	27.93%	36.70%	64.63%	40.43%

Как показано, из табл. 3.7а и 3.7бс увеличением числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчётов при заданной точности. В частности, для модели турбулентности buoyantkEpsilon количество итераций уменьшается на 27.93 %, а время расчёта сокращается на 27.82%. Для kOmegaSST модели турбулентности эти показатели составляют 61.30% и 64.63% соответственно.

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.

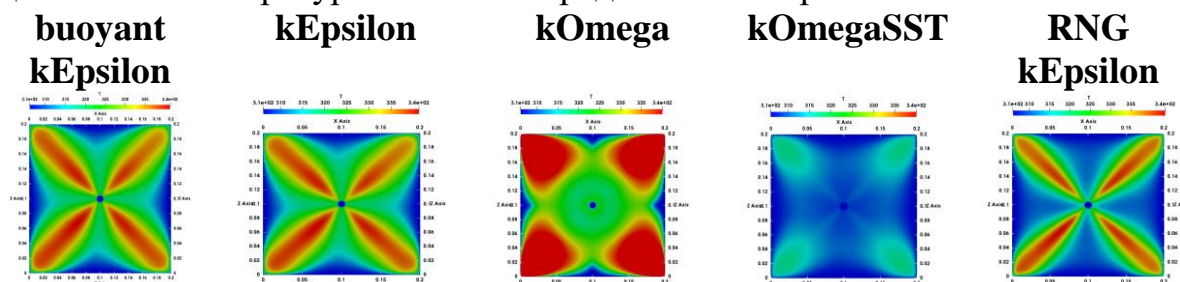


Рисунок 3.10–Распределение температурного поля на поверхности при входной скорости 39м/с.

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

Таким образом, в результате моделирования этой задачи получено достаточно точное совпадение численных значений средней температуры с соответствующими экспериментальными данными в 21 точке с точностью не более 1.12%, что свидетельствует об адекватности тепловой модели этой задачи и о возможности её применения в задаче моделирования движения воздуха в модели больничной палате.

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.

Проведенный аналитический обзор существующих методов численного моделирования турбулентных струйных течений показал, что существенное влияние на численное решение имеет входные граничные условия для турбулентных характеристик струи (скорость диссипации кинетической энергии турбулентности ε , и её частота диссипации ω), так как не существуют единых эмпирических соотношений по вычислению их значений.

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).

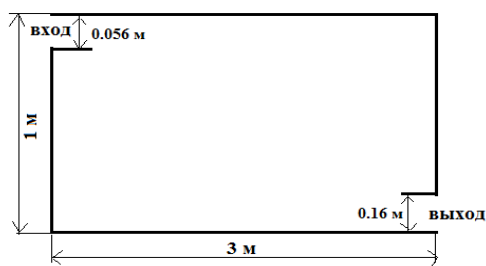


Рисунок 3.11а-Геометрия модели
3м×1м×1м

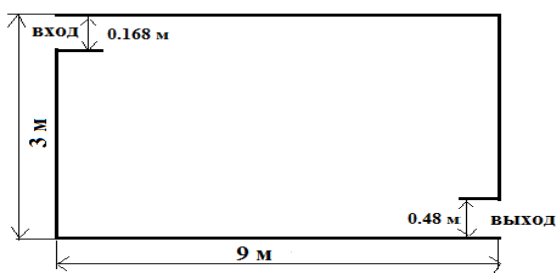


Рисунок 3.11б-Геометрия модели
9м×3м×1м

Высота первой модели $H=1\text{м}$, в второй модели $H=3\text{м}$, а длины моделей равны 3м и 9м 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). Начало систем координат расположен в левом нижнем углу левой стенки, ось Ox направлена слева направо, а ось Oy вертикально вверх.

Математическая модель задачи состоит из уравнений (1-2), дополненных соответствующими моделями турбулентности: kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG.

Численная модель. На входе в расчётную область заданы экспериментальные значения входной продольной скорости. На выходной границе был задан нулевой продольный градиент для всех искомых переменных. Остальные границы расчётной области представляют собой сплошные стенки, на которых заданы условия прилипания для скорости, а турбулентные характеристики вычисляются при помощи аппарата пристеночных функций.

Дискретизация расчетной области и основных уравнений проведена аналогично первой задаче. Численное решение полученных систем линейных алгебраических уравнений совместно с начальными и граничными условиями решается с использованием известной процедуры PISO.

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%. Как видно, турбулентная струя воздуха ударяется о правую стенку, опускается вниз, затем часть её струи выходит из области, а основная часть движется в сторону левой стенки.

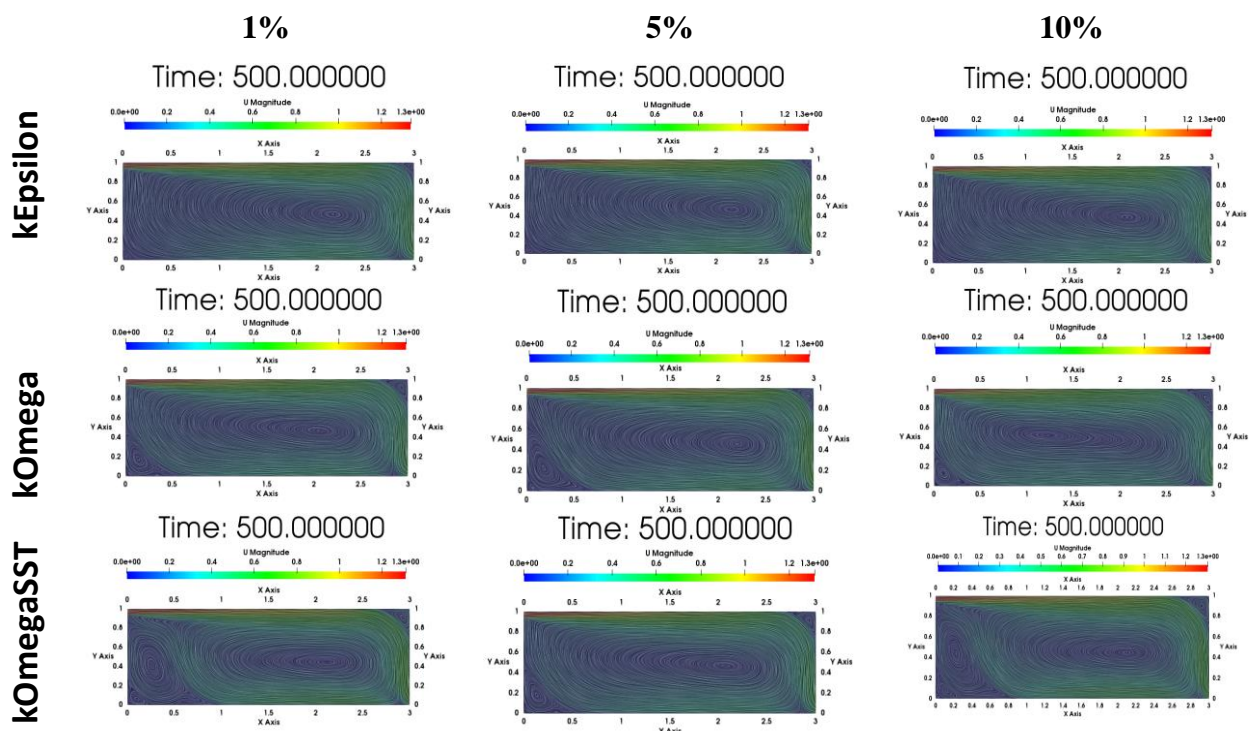


Рисунок 3.12- Изолинии модуля скорости при разных моделях и при разных интенсивностях

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.

модели

kEpsilon

kOmegaSST

3x1
1H

9x3
1H

3x1
1H

9x3
1H

1%

5%

10%

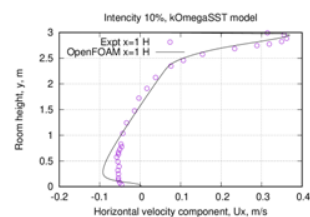
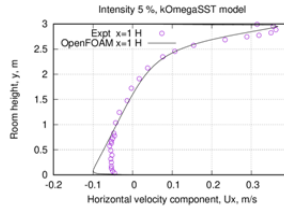
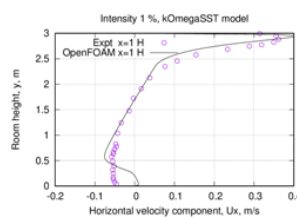
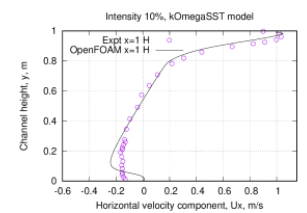
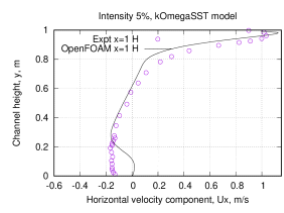
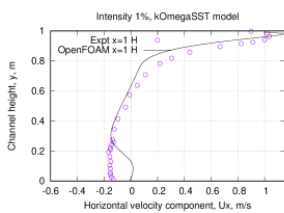
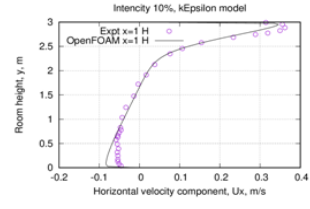
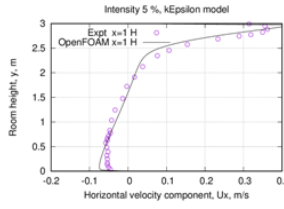
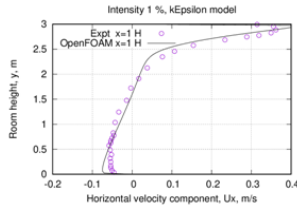
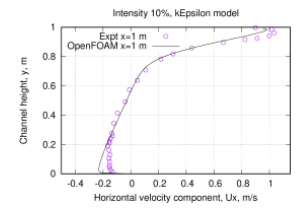
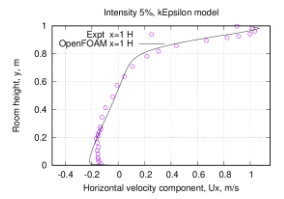
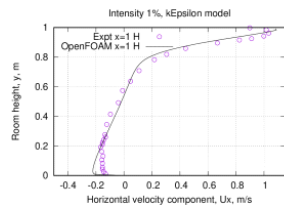


Рисунок 3.13–Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=1H$.

1%

5%

10%

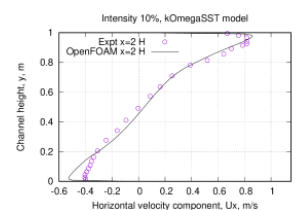
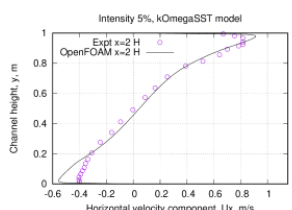
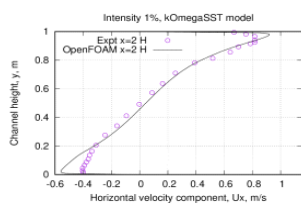
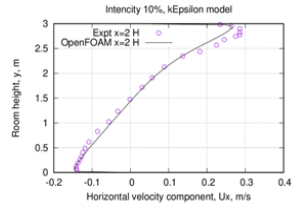
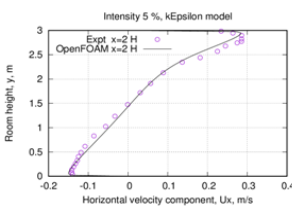
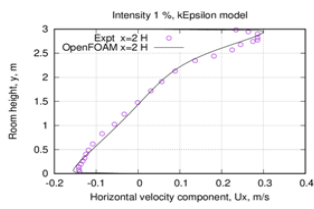
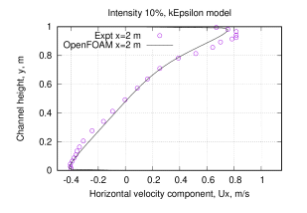
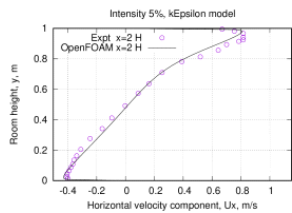
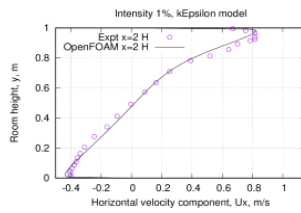
3x1
2H

9x3
2H

3x1
2H

kEpsilon

kOmegaSST



9×3
2H

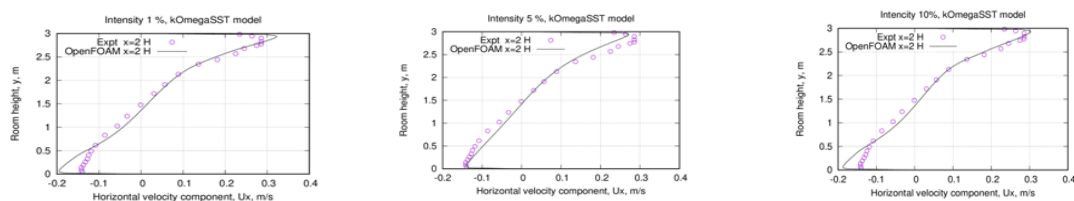


Рисунок 3.14–Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=2H$.

Как показано на этих рисунках, интенсивность турбулентности входной струи существенно влияет на поле средней скорости течения вблизи твёрдых стенок расчётной области. В целом совпадение между численными и экспериментальными данными можно считать хорошим.

Соответствие между экспериментом и численным расчётом ухудшается при использовании модели $k-\omega$ 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. Центр прямоугольного выхода имеет координаты (4.05, 1.8, 3.0). Адекватность используемой математической модели и достоверность численных результатов проверяется путем сравнения с экспериментальными данными работы VatrakM. и др. (2001).

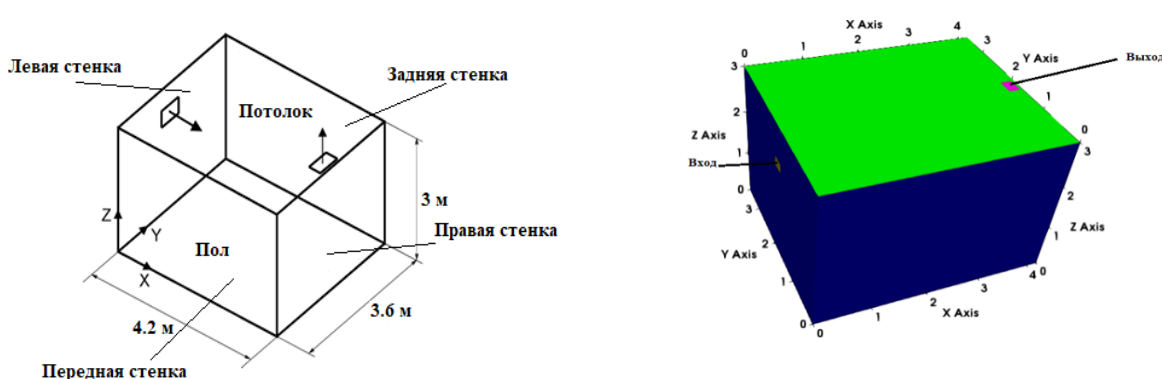


Рисунок 3.15– Гексаэдральная модель помещения (слева) и расчетная область (справа).

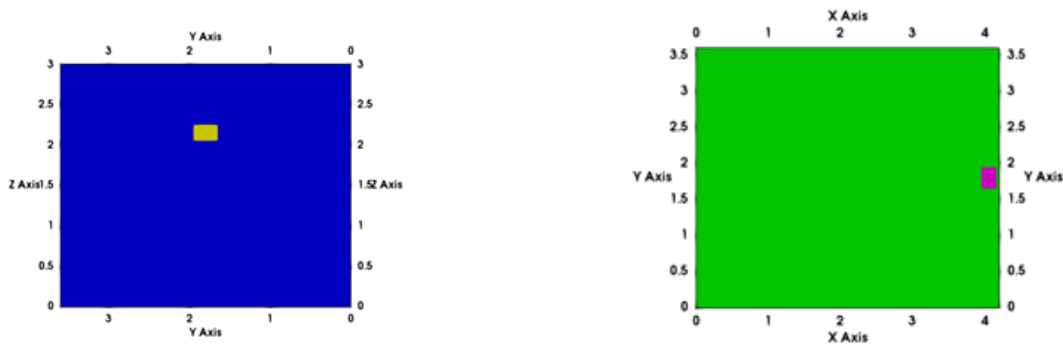


Рисунок 3.16–Схемы расположения входного (слева) и выходного (справа) отверстий.

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 45.36 м^3 .

Математическая модель. Моделирование движения воздуха в помещении основывается на системе уравнений (1-4) с дополнением соответствующими моделями турбулентности kEpsilon (5-6) и следующего уравнения для возраста воздушного потока:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tau) + \nabla(\mathbf{u}\tau) - \nabla \cdot \left(\frac{\rho\mu_{eff}}{\sigma_{eff}} \nabla\tau \right) = 1 \quad (3.7)$$

где τ – возраст воздуха, измеряемый в секундах, σ_{eff} – эффективное число Шмидта, μ_{eff} – эффективная вязкость, а ρ – плотность воздуха.

Численная модель. Дискретизация основных уравнений (1-7) проведена с использованием метод конечных объемов аналогично предыдущей задаче. Полученные при этом СЛАУ решаются итерационным методом SIMPLE.

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.

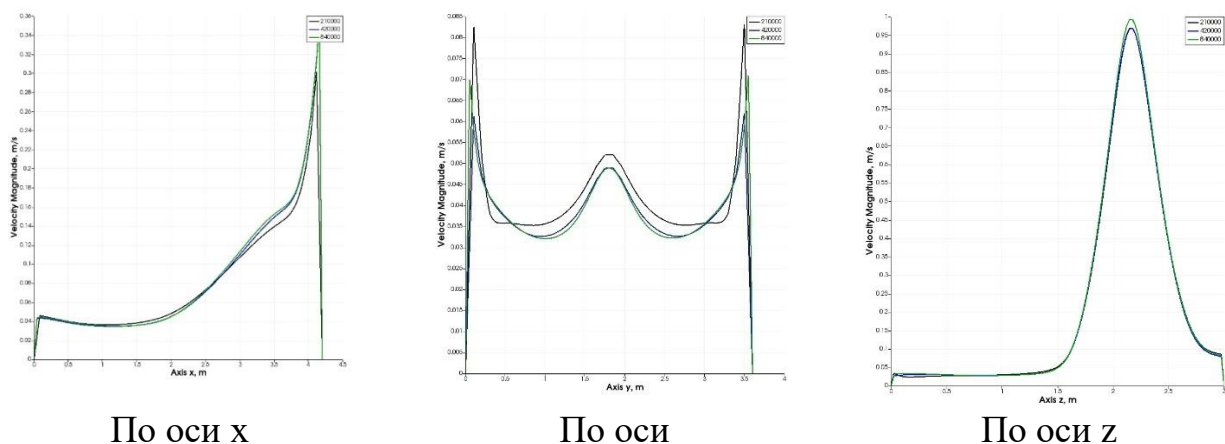


Рисунок 3.17– Сравнение профилей модуля скорости.

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. Распределение поля модуля скорости воздуха показано на рисунке 3.18аб, с указанием вертикальных линий $x=1.13$ м и $x=3.2$ м, в некоторых точках которых экспериментально измерены усреднённые локальные значения возраста воздуха.

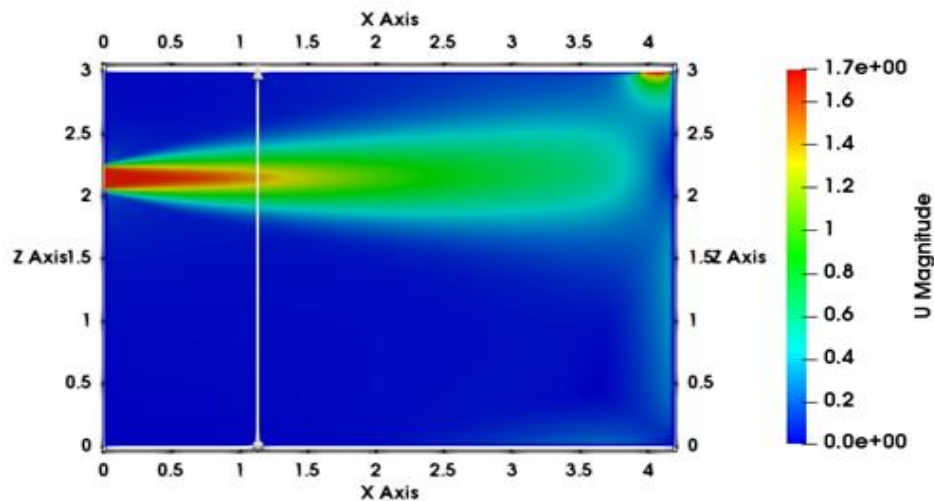


Рисунок 3.18а. Вертикальная линия $x = 1.13$ м.

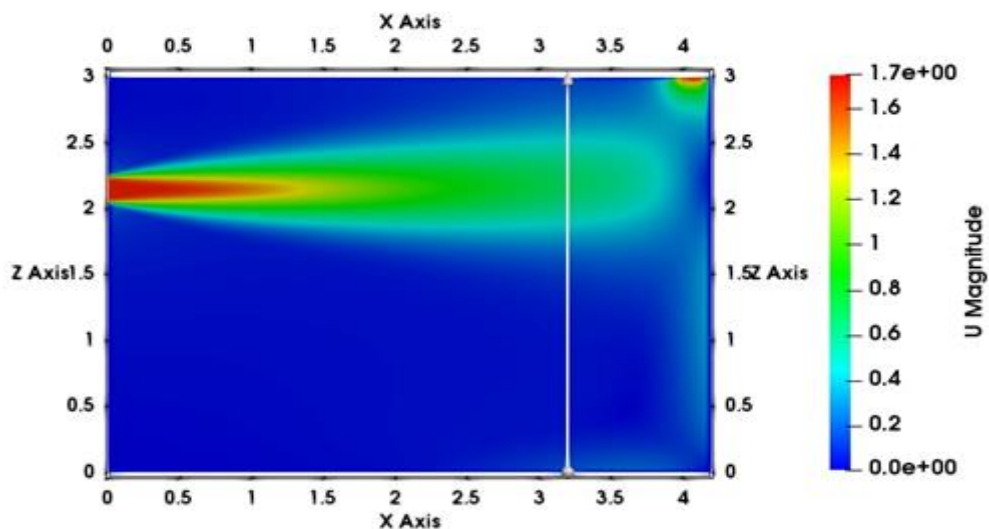


Рисунок 3.18б. Вертикальная линия $x=3.2$ м.

Распределение модуля скорости, представленное на рисунке 3.18, показывает важные особенности воздушного потока в помещении. По мере приближения к правой стенке помещения ближе в вертикальной линии $x=3.2$ м. наблюдается заметное смещение вверх максимального значения модуля скорости струи воздуха. Это смещение связано с изменением направления

потока, происходящим под воздействием взаимодействий потока воздуха с стенками помещения и выходным вентиляционным отверстием.

Процесс смещения струи вверх при движении в сторону выхода объясняется изменением соотношений давления и скорости внутри потока. При движении воздуха в помещении, особенно вблизи стен и других препятствий, часто возникают локальные турбулентности, которые могут изменять траекторию потока. В частности, по мере того как воздух движется в сторону правой стенки, эти турбулентности усиливаются, что приводит к подъему струи в направлении потолка и выходного отверстия. Это явление является следствием взаимодействия струи с ограничениями помещения, а также отражает влияние геометрической симметрии и размещения вентиляционных отверстий на динамику воздушных потоков.

Кроме того, важным наблюдением является уменьшение максимальной скорости струи в сечении $x=3.2\text{ м}$, где она оказывается в два раза меньше по сравнению с максимальной скоростью на сечении $x=1.13\text{ м}$ (рис. 3.19).

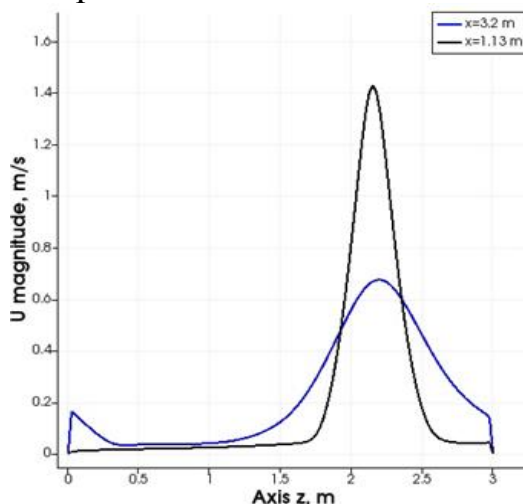


Рисунок 3.19– Вертикальные профили модуля скорости струи в двух сечениях вниз по потоку

Это снижение скорости связано с потерей энергии потока по мере его распространения через помещение. Воздух, поступающий в помещение через входное вентиляционное отверстие, постепенно теряет кинетическую энергию из-за трения с поверхностями, турбулентности и перераспределения потоков. Поэтому на выходе из помещения наблюдается уменьшение модуля скорости, что соответствует типичной картине замедления движения воздушных масс в более удаленных от вентиляционных отверстий.

Интересным эффектом является повышение скорости около пола ($z=0\text{ м}$) и потолка ($z=3\text{ м}$) в сечении $x=3.2\text{ м}$. Увеличение скорости в этих областях может быть объяснено перераспределением воздушных потоков, где более низкие слои воздуха вблизи пола и верхние слои возле потолка испытывают ускорение. Это явление часто связано с эффектами "поверхностного" воздушного потока, когда частицы воздуха, двигаясь по направлению к стенкам и потолку, ускоряются из-за уменьшения турбулентности и увеличения плотности потоков в этих зонах. Также стоит отметить, что вблизи пола и потолка обычно наблюдаются более

низкие скорости потока, что связано с ограниченной циркуляцией воздуха в этих областях. Однако в месте сечений $x=3.2\text{ м}$, с увеличением скорости на этих уровнях, может наблюдаться активизация движения воздуха, что способствует улучшению циркуляции и качеству воздухообмена.

После соударения с правой стенкой часть воздушного потока направляется вверх в сторону выхода, расположенного на потолке, а другая часть движется вниз вдоль правой стенки (см.рис.3.20). Достигнув пола, этот поток изменяет направление влево, формируя крупное рециркуляционное течение с центром в точке примерно ($x = 3.6\text{ м}$, $y = 1.8\text{ м}$, $z = 0.5\text{ м}$). Это свидетельствует о наличии зон застоя и турбулентности, что может существенно повлиять на качество воздуха в помещении. Результаты моделирования подчеркивают важность оптимального размещения вентиляционных элементов для минимизации рециркуляционных зон и обеспечения равномерного воздухообмена.

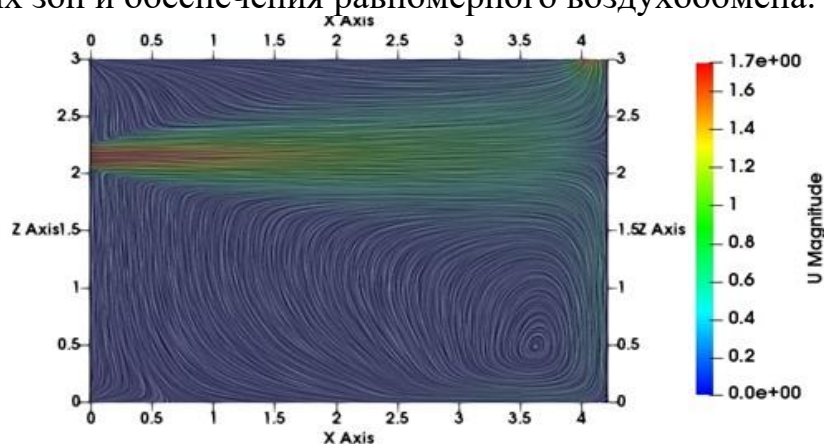


Рисунок 3.20–Изолинии модуля скорости в плоскости $y=1.8\text{ м}$.

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 дают 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				Upwinded convection schemes			
		cubic	linear	midPoint	Gamma	SFCD	limited Linear	minmod	MUSCL	vanLeerV	filtered Linear2	linear Upwind	QUICK	upwind
1	453.6	472.70	472.70	472.708	474.09	474.73	476.3	475.61	473.94	611.90	472.70	486.41	486.41	611.90
2	459.7	470.98	470.98	470.98	472.31	473.71	474.31	474.60	472.49	615.76	470.98	489.07	489.07	615.76
3	443.3	471.32	471.32	471.326	472.67	474.14	474.67	475.03	472.87	616.63	471.32	489.90	489.90	616.63
4	291.5	236.67	236.67	236.673	237.37	237.85	237.85	238.19	236.49	304.69	236.67	245.77	245.77	304.69
5	180.6	126.15	126.15	126.152	126.45	125.81	126.42	126.19	125.14	160.63	126.15	129.12	129.12	160.63
6	443.3	460.80	460.80	460.801	462.21	463.46	463.44	463.92	461.98	586.93	460.80	477.23	477.23	586.93

7	432.55	425.77	425.77	425.774	427.03	427.62	429.02	428.46	426.66	553.8	425.77	436.61	436.61	553.80
8	461.43	439.20	439.20	439.201	440.78	441.77	443.00	442.73	440.34	576.64	439.20	453.63	453.63	576.64
9	275.44	236.42	236.42	236.428	236.43	236.38	236.78	236.90	235.81	303.49	236.42	244.03	244.03	303.49
10	446.46	411.82	411.82	411.823	413.32	413.54	415.68	414.62	412.88	539.36	411.82	422.72	422.72	539.36
11	497.43	428.86	428.86	428.863	430.55	431.26	432.98	432.35	430.01	563.52	428.86	442.44	442.44	563.52
12	342.49	301.02	301.02	301.022	301.34	301.87	302.01	302.39	301.11	389.12	301.02	312.07	312.07	389.12
13	454.61	409.73	409.73	409.732	411.30	412.18	413.39	412.95	411.15	527.99	409.73	425.29	425.29	527.99
14	538	361.52	361.52	361.527	362.42	363.10	363.62	363.63	362.39	467.48	361.52	375.18	375.18	467.48
15	318	227.44	227.44	227.447	227.34	227.17	227.57	227.61	226.70	291.38	227.44	234.49	234.49	291.38
16	390	296.77	296.77	296.779	297.04	297.54	297.65	298.05	296.81	576.64	296.77	307.54	307.54	383.26
17	529	439.20	439.20	439.201	440.78	441.77	443.00	442.73	440.34	563.29	439.20	453.63	453.63	576.64
18	566	428.74	428.74	428.744	430.43	431.12	432.87	432.21	429.88	489.27	428.74	442.21	442.21	563.29
19	426.38	374.59	374.59	374.596	375.65	376.72	377.21	377.43	375.63	488.77	374.59	390.68	390.68	489.27
20	426.38	374.12	374.12	374.122	375.14	376.26	376.65	376.94	375.22	529	374.12	390.45	390.45	488.77
21	489.88	414.75	414.75	414.755	416.33	416.58	417.45	416.77	415.13	408	414.75	419.25	419.25	529.40
22	458.13	414.88	414.88	414.883	416.46	416.59	417.67	416.76	415.21	529.84	414.88	419.49	419.49	529.84
23	439.99	390.62	390.62	390.63	391.78	393.28	393.13	393.8	391.62	507.34	390.62	405.86	405.86	507.34
24	421.84	390.67	390.67	390.678	391.79	393.25	393.12	393.76	391.76	507.72	390.67	406.11	406.11	507.72
средняя ошибка, %	13.506	13.506	13.5067	13.364	13.305	13.18	13.204	13.477	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. 3.21 а,б).

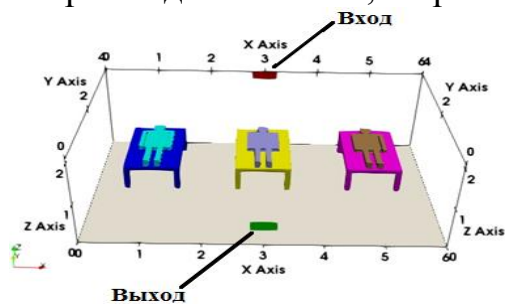


Рисунок 3.21 а– Модель инфекционной палаты с тремя пациентами

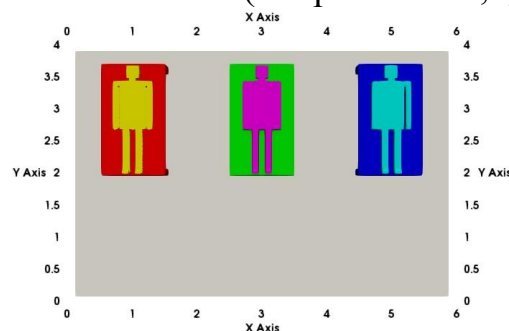


Рисунок 3.21 б–Схема расположения пациентов

Начало системы координат расположено в ближнем нижнем углу левой стенки. Входное и выходное отверстия имеют форму прямоугольника размерами 0.5 м × 0.2 м. 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.

Математическая модель задачи. Основу модели составляют система уравнений (1-4).

Численная модель. Дискретизация расчётной области выполнена с использованием стандартных утилит *blockMesh* и *snappyHexMesh* пакета *OpenFOAM*. 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 3.22–3.23 представлены поля векторов скорости для двух значений выходного давления модели палаты: $P_{out}=0$ Па (рис.3.22) и $P_{out}=-4$ Па (рис. 3.23). Снижение граничного условия для давления с $P_{out}=0$ Па до $P_{out}=-4$ Па приводит к существенным изменениям картины течения в модели палаты.

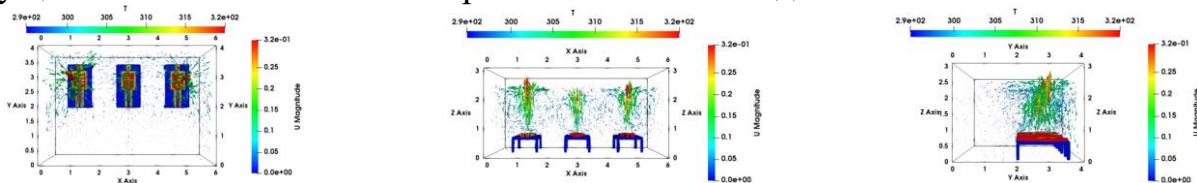


Рисунок 3.22 – Поле вектора скорости при давлении $P_{out} = 0$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа).

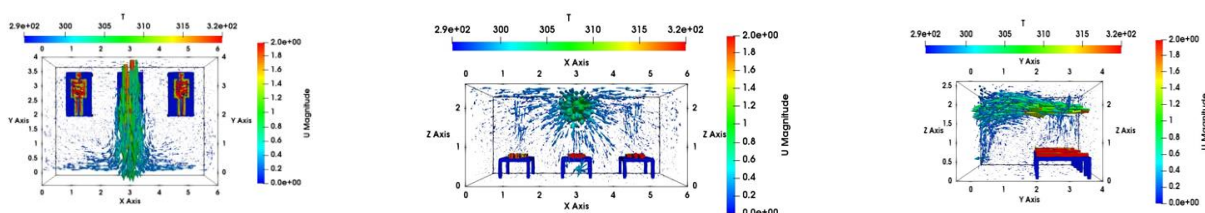
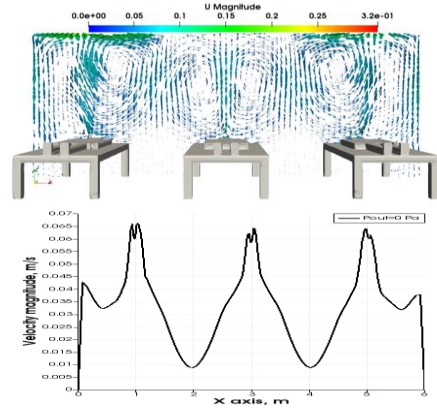
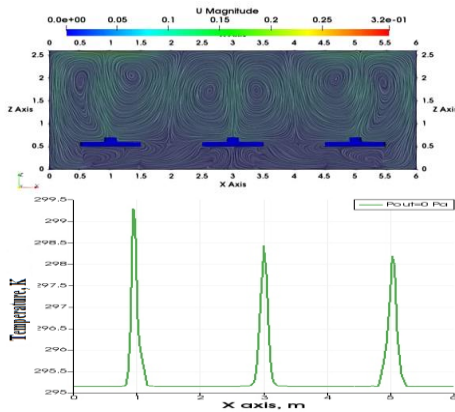


Рисунок 3.23 – Поле вектора скорости при давлении $P_{out} = -4$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа).

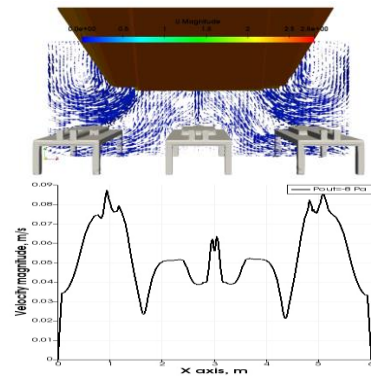
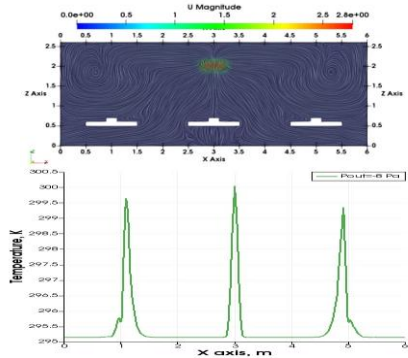
Видно, что по всей палате происходит перестройка картины течения — от свободной конвекции с максимальной скоростью 0.32 м/с до 1.8 м/с. При этом наблюдается интенсификация процесса конвекции: свободная конвекция переходит во вынужденную. Это отчётливо видно на рис. 3.23, где представлены изолинии модуля скорости, поле векторов скорости, а также горизонтальные профили температуры и скорости на средней высоте палаты.

Получен симметричный продольный профиль температуры и модуля средней скорости (вдоль оси Ox) с максимальной ошибкой 2.69% и 5.67% соответственно, что видно на рис. 3.24. При $P_{out}=0$ Па наблюдается образование конвективных ячеек Рэлей-Бенара.

$P_{out} = 0$ Па



$P_{out} = -8$ Па



$P_{out} = -16$ Па

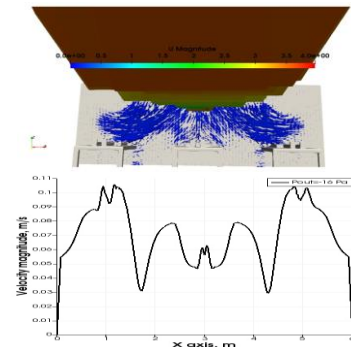
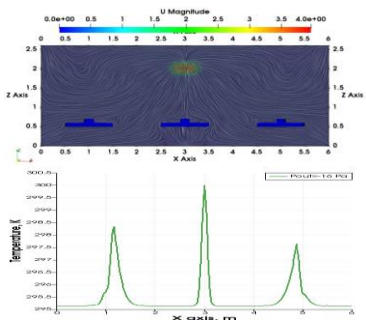


Рисунок 3.24 – Изолинии и поле скорости, профили температуры и скорости.

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 ($P=0$ Па). При этом величина смещения увеличивается с ростом отрицательного выходного давления помещения.

Как известно, в пакете OpenFOAM уравнение для энергии можно записать через энтальпию и внутреннюю энергию. Для проверки адекватности используемой математической модели и достоверности полученных результатов были проведены расчёты для двух термодинамических моделей, основанных на уравнениях переноса энтальпии и внутренней энергии, для расчёта температуры.

На рисунках 3.25–3.26 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.

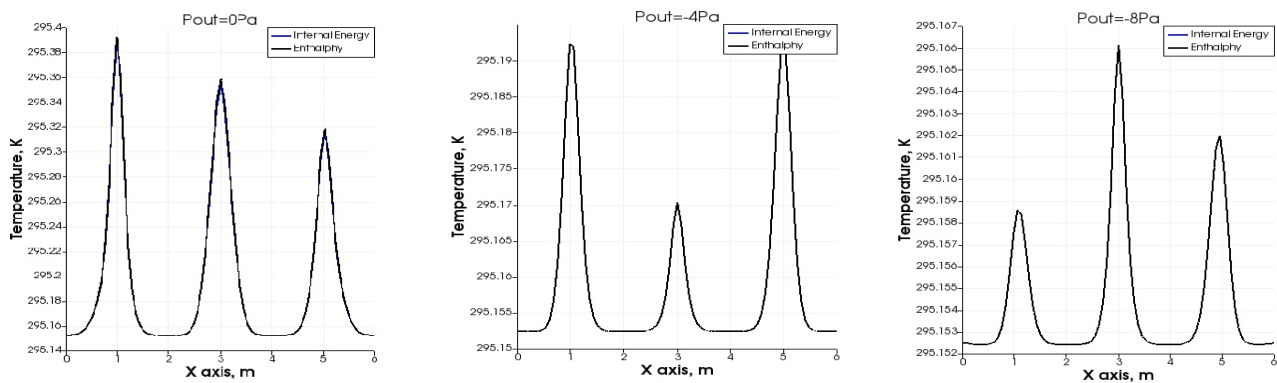


Рисунок 3.25–Профиль температуры при разных давлениях

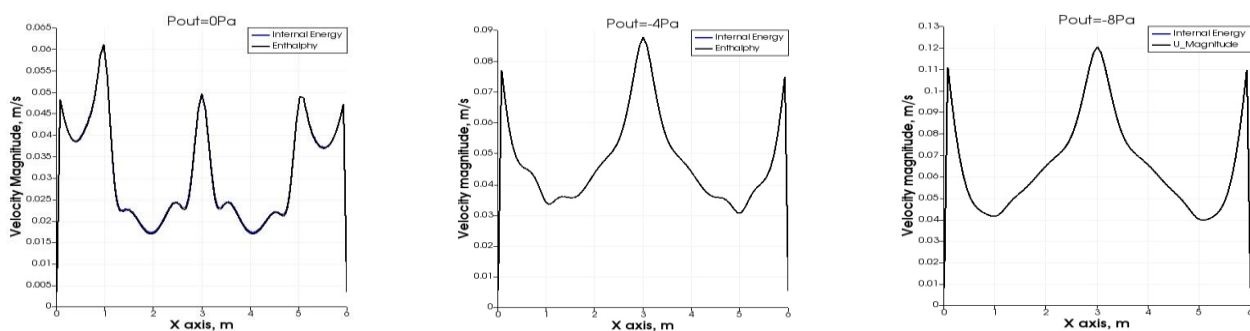
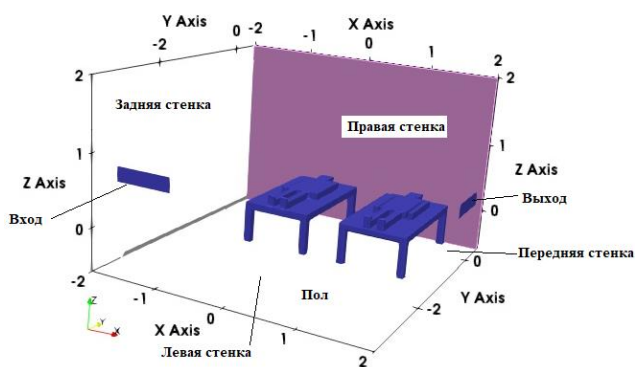


Рисунок 3.26–Профиль модуля скорости при разных давлениях

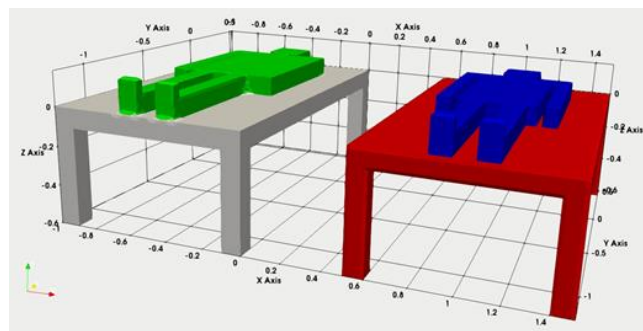
Проведено исследование влияния отрицательного выходного граничного условия для давления на гидродинамические характеристики течения воздуха в модели инфекционной палаты. Обнаружено, что уменьшение граничного условия для давления с $P_{out}=0$ Па до $P_{out}=-8$ Па приводит к существенным изменениям всей картины течения в модели палаты. Проведены численные расчеты с использованием двух термодинамических моделей для вычисления температуры воздушного потока в пакете OpenFOAM. Одна из моделей основана на энтальпии, другая — на внутренней энергии. 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).



а)



б)

Рисунок 3.27– 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 (1-4) дополненная с уравнением (7).

Численная модель. Начальные значения полей модуля скорости и давления заданы равными нулю, температура потока в расчетной области равна 295.15 К . Начальное значение возраста воздуха полагается равным некоторому большому числу, так как в начале вентиляция помещения отсутствовала. Значения давления на входе полагались 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 условия 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. Остальные граничные условия, методы дискретизации и решения СЛАУ аналогичны задаче-4. Для дискретизации нестационарного члена систем уравнений (3.1-3.7) использовался метод Эйлера. Для обеспечения устойчивости итерационного процесса число Куранта-Фридрихса и Леви не превышало 1.

Результаты численных расчетов и обсуждение. Поле модуля скорости воздушно потока вдоль горизонтальной плоскости $z=0.7 \text{ м}$ приведены на следующих рисунках 3.28. 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 .

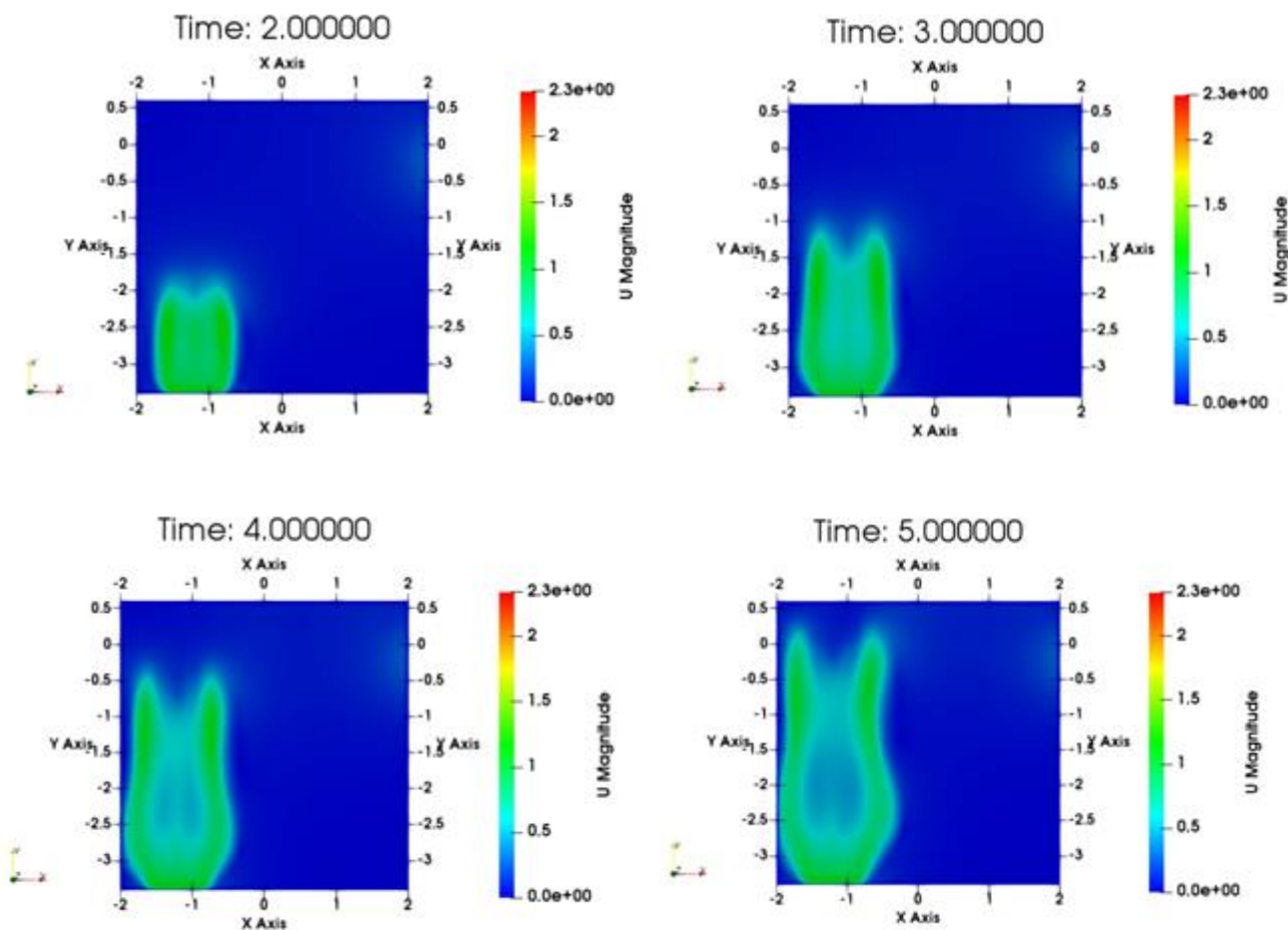
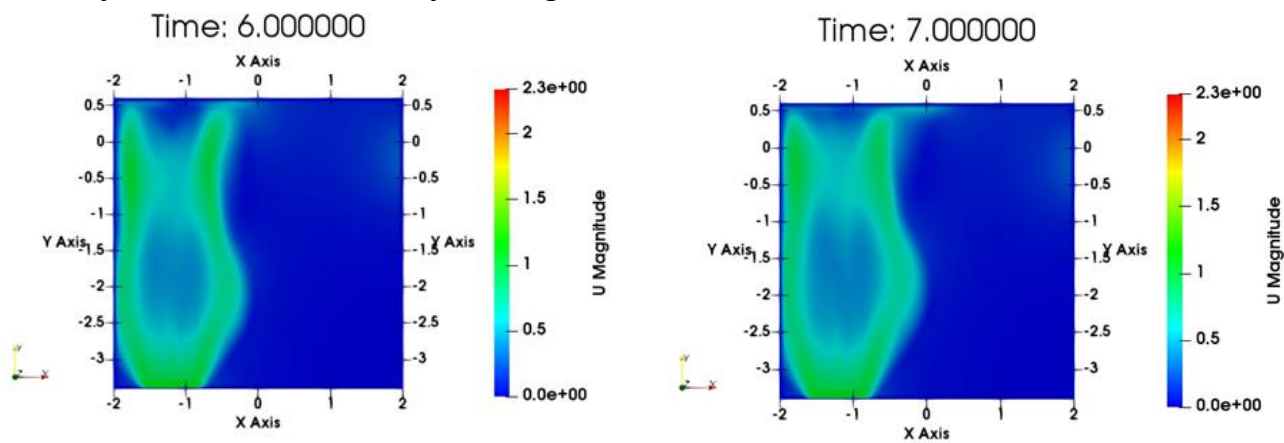


Рисунок 3.28– Поле модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $P_{\text{out}} = -4\text{ Па}$.



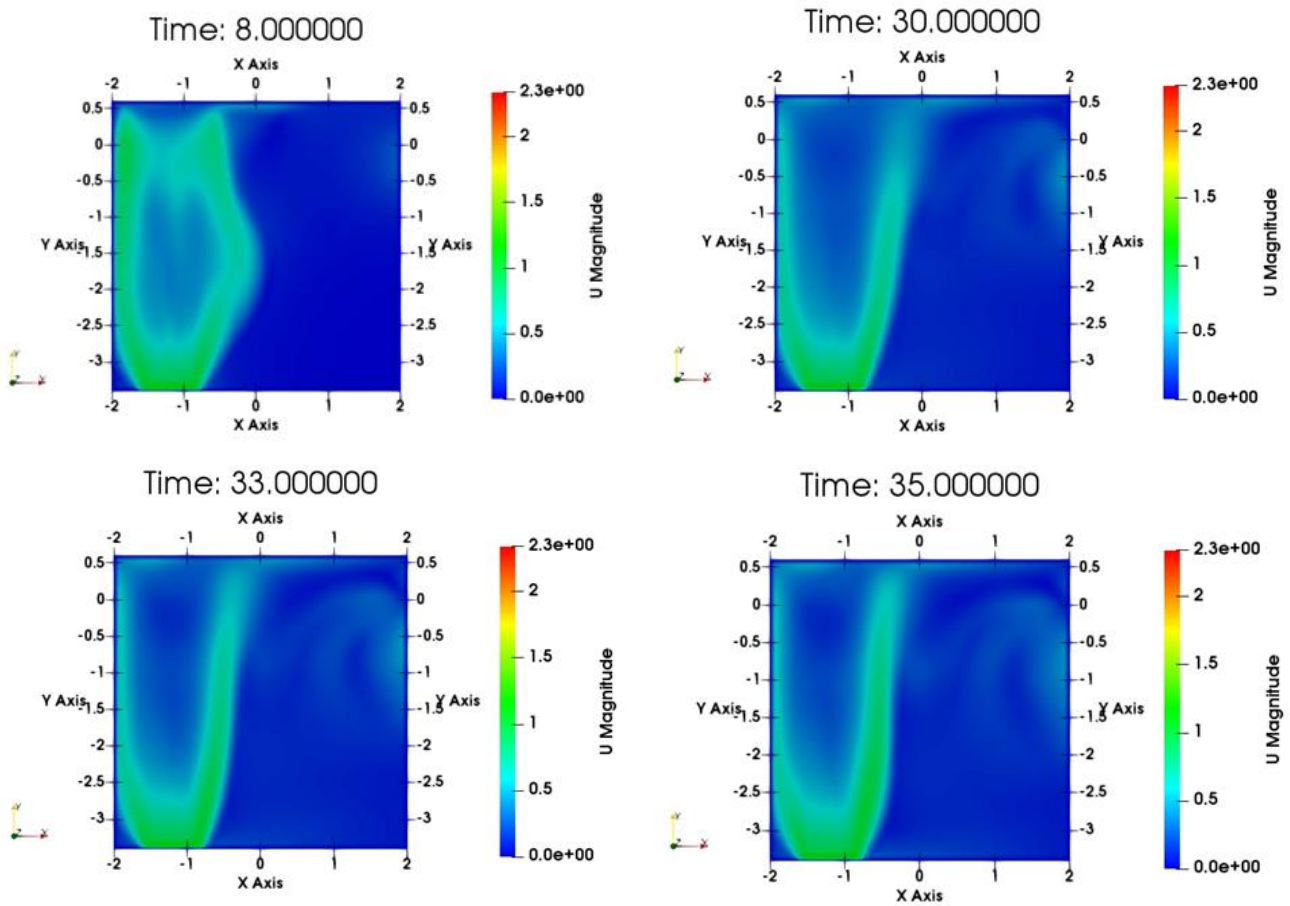
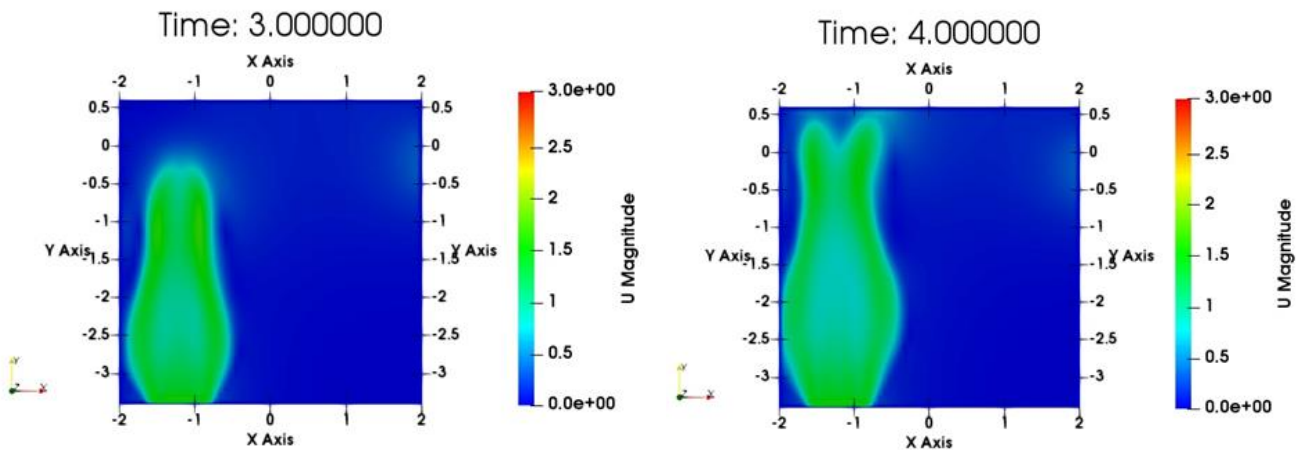


Рисунок 3.29 – Поле модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $P_{out} = -4\text{ Па}$.

За 6 секунд от начала входа в помещение струя достигает правой стенки, и её нижняя граница заметно расширяется в сторону, свободную от стенки. Такое же поведение нижнего края прямоугольной струи наблюдается и в промежутке времени от 30 до 35 секунд.

Такое поведение нижнего края струи наблюдается и для моментов времени от 3 с до 5 с, в течении которого струя достигнув правую стенку отражается от нее (момент времени 6с), что отчетливо видно на следующем рисунке 3.30.



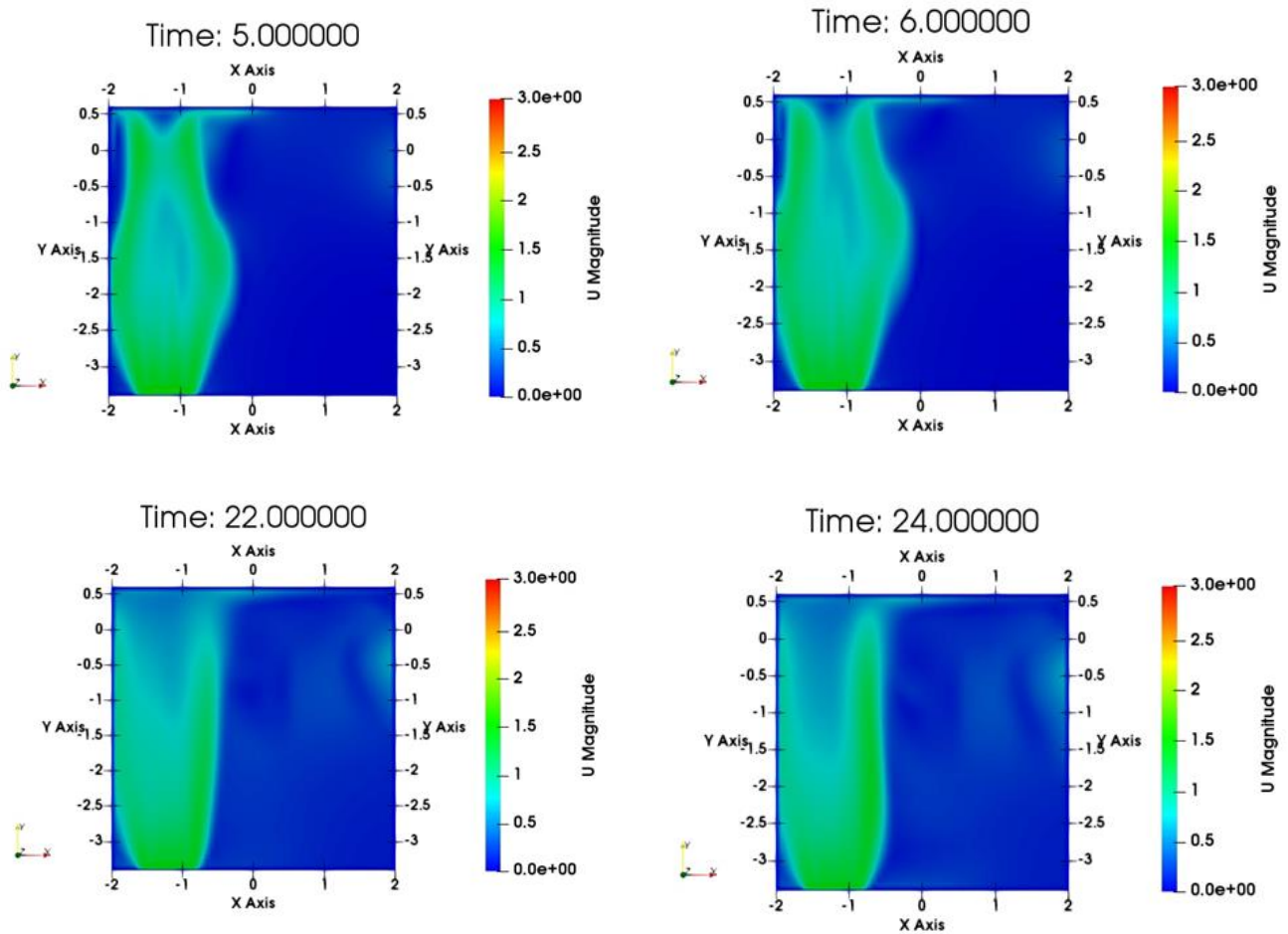
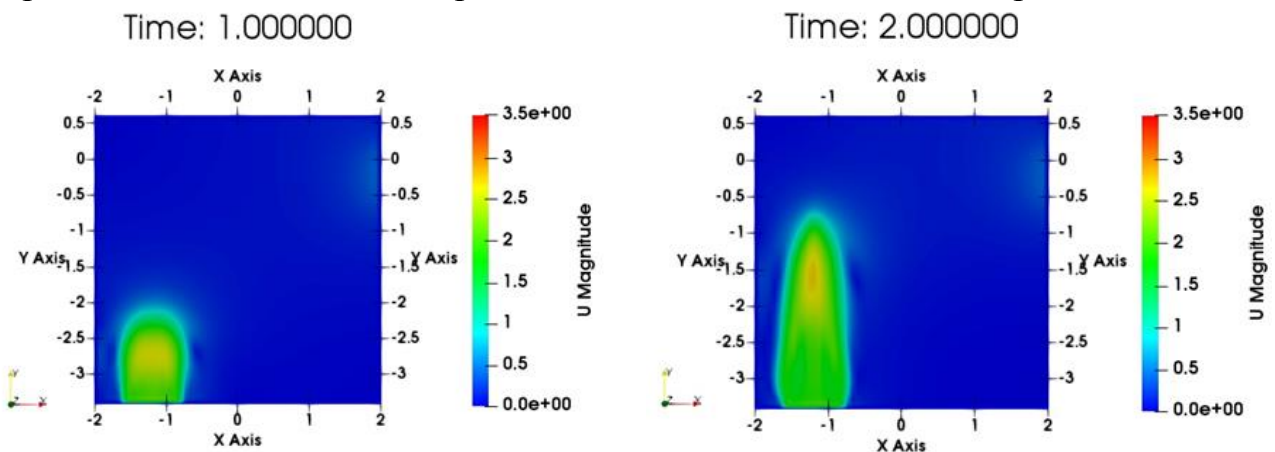


Рисунок 3.30– Поле модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $P_{\text{out}} = -8\text{ Па}$.

Разделение переднего фронта нижнего края струи еще наблюдается для моментов времени от 22 с до 30 с, что имеет место чуть раньше, чем для случая, когда выходное давление модели инфекционной палаты было равно -4 Па .

Для случая, когда выходное давление модели инфекционной палаты равно -12 Па , 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.3.31.



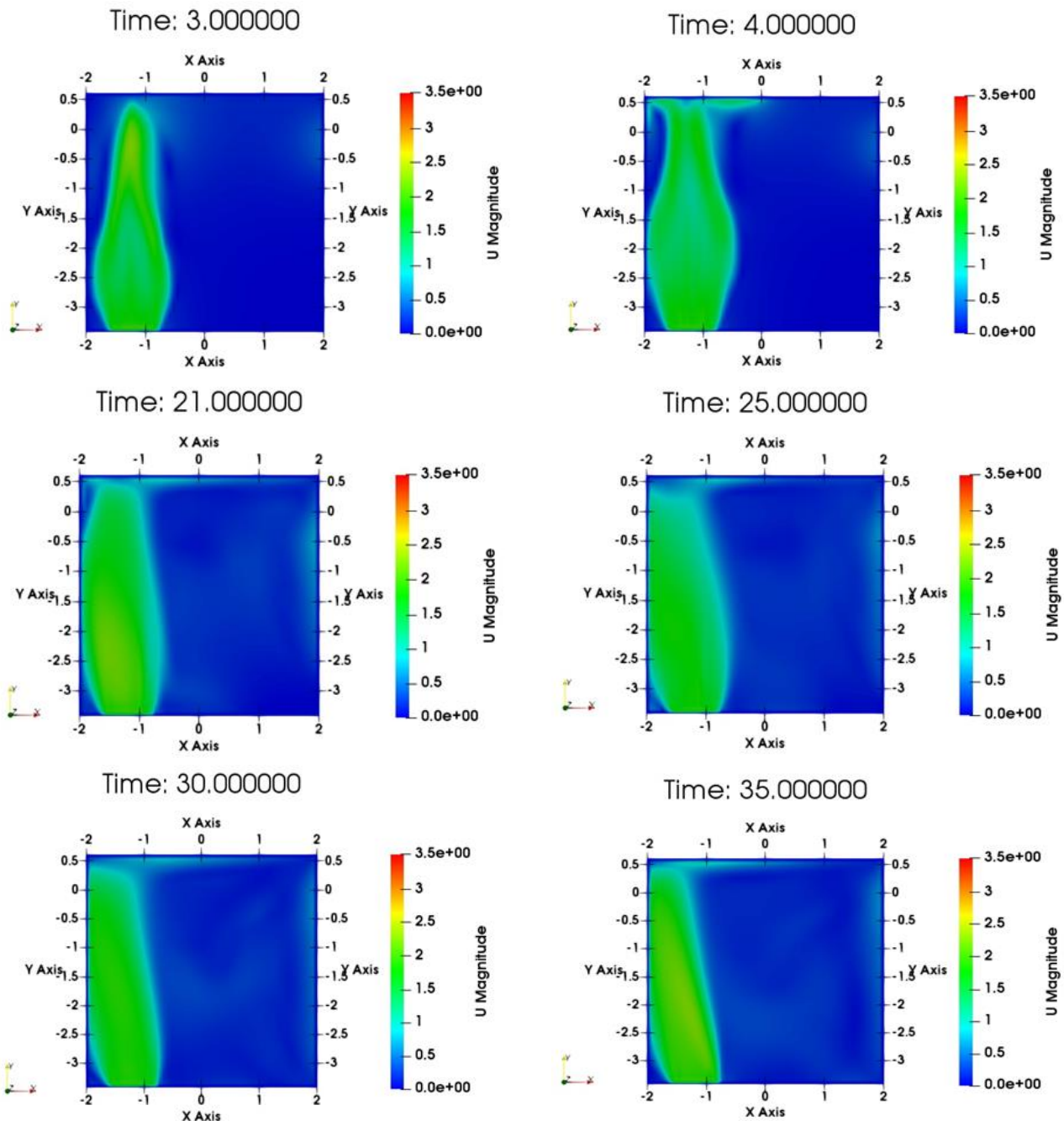


Рисунок 3.31 – Поле модуля скорости на плоскости $z=0.7$ и для $P_{out} = -12$ Па.

Передний фронт струи достигает правой стенки примерно за три с лишним секунд, а в момент времени 4с струя начинает терять свою симметрию. Здесь, начиная от момента времени 21с до момента времени 35с наблюдается смещение потока в сторону задней стенки, что является образованием большого вихревого течения права от струи (со стороны передней стенки). Такое же поведение имеет место и для случая $P_{out} = -16$ Па.

На следующих рисунках 3.32-3.35 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.

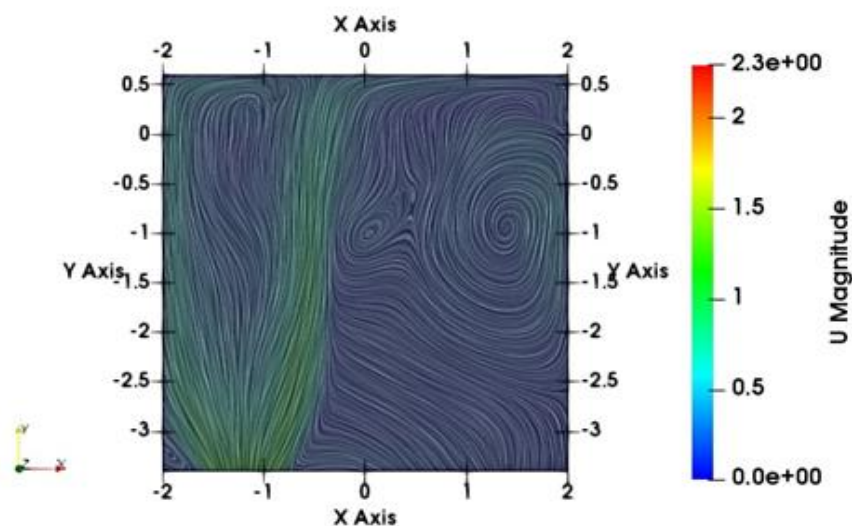


Рисунок 3.32- Изолинии модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $Р_{out}=-4\text{Па}$.

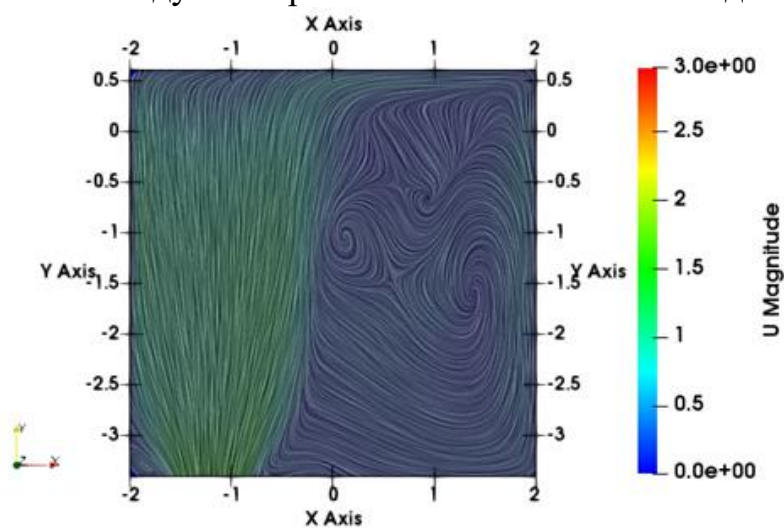


Рисунок 3.33- Изолинии модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $Р_{out}=-8\text{Па}$.

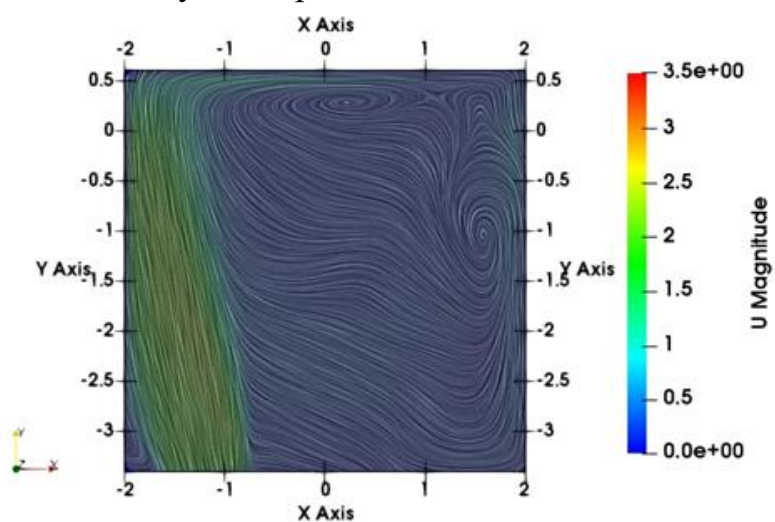


Рисунок 3.34 - Изолинии модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $Р_{out}=-12\text{Па}$.

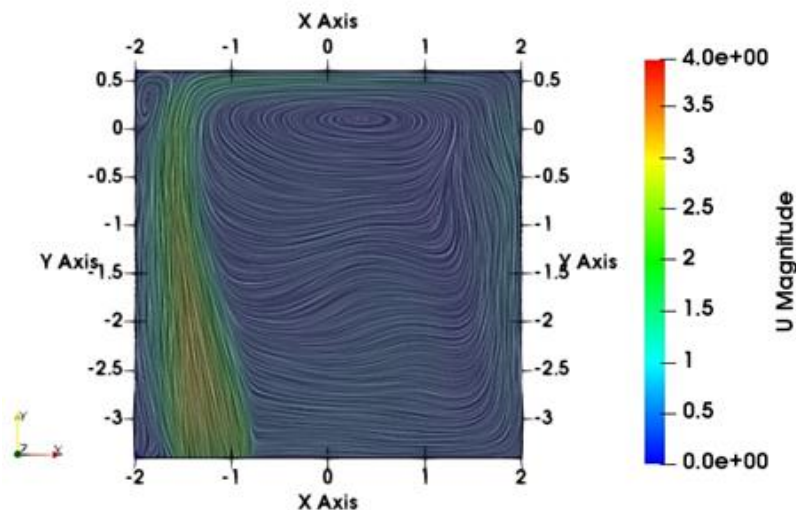


Рисунок 3.35- Изолинии модуля скорости на плоскости $z=0.7\text{м}$ для $R_{out}=-16\text{Па}$.

Численные результаты по модулям скорости и возраста воздуха в точках около лиц двух пациентов представлены на следующих рисунках 3.36 и 3.37 соответственно.

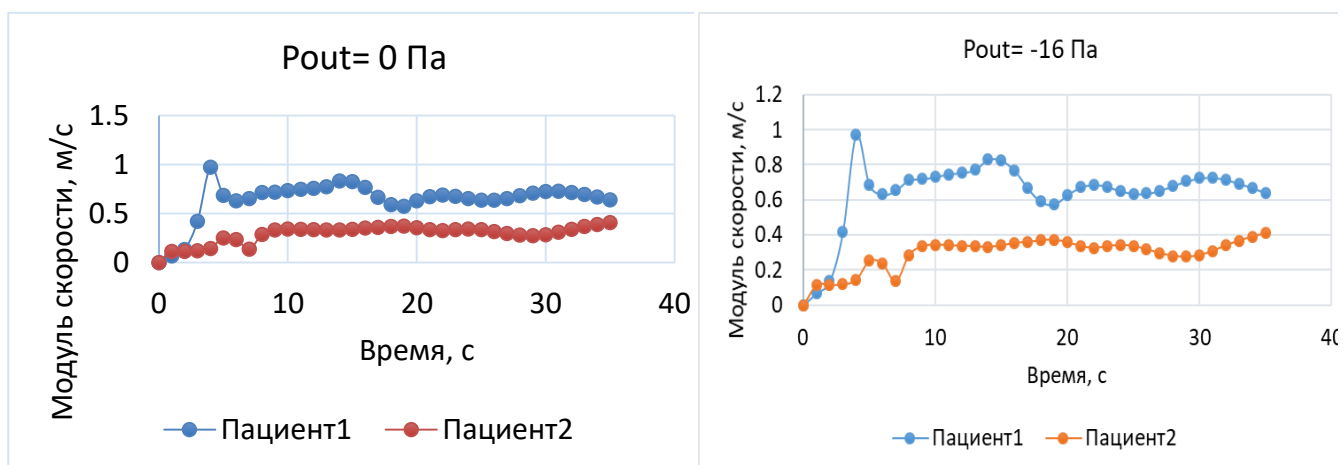


Рисунок 3.36 - График зависимости модуля скорости воздуха от времени

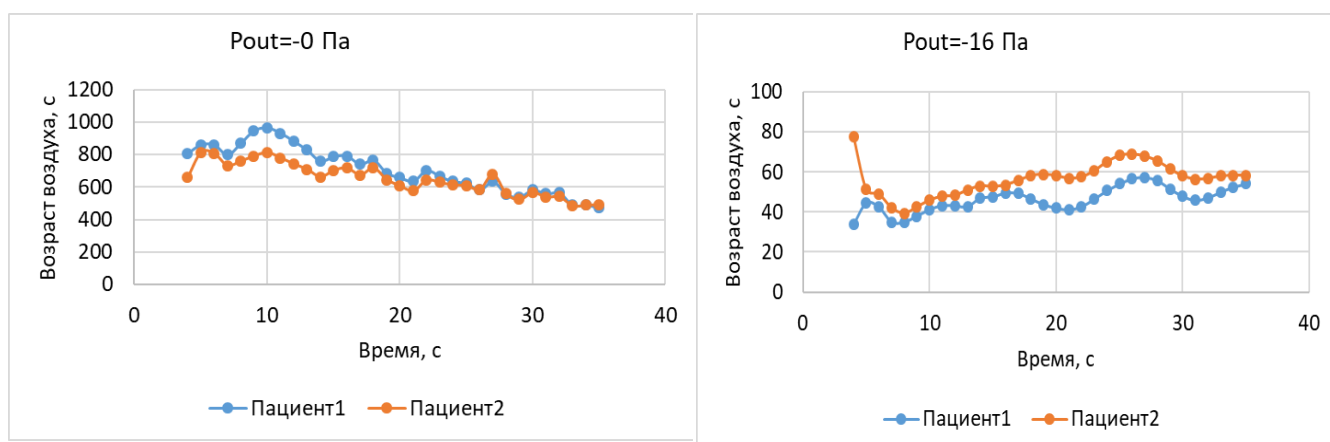


Рисунок 3.37- График зависимости возраста воздуха от времени

Сравнение этих рисунков показывает, что в случае естественной конвекции, когда $P_{out}=0$ Па, условия комфортности по скорости воздуха для обоих пациентов практически одинаковые, кроме моментов времени примерно от 4с до 18с. После времени от 20с модуль скорости в точке около лиц двух пациентов равно примерно 0.07м/с и согласно требованиям международного стандарта по эргономике помещений скоростной режим является комфортным, отсутствует ощущение сквозняка. С ростом абсолютного значения отрицательного выходного давления палаты разница в значениях скоростей увеличивается, причем скорости воздуха у второго пациента меньше чем у первого и он находится более выгодном положении – ощущение сквозняка у него меньше.

Результаты численных расчетов значений возраста воздуха в секундах и модуля скорости около лицевой части двух пациентов при разных выходных давлениях для момента времени 35с приведены в следующей табл. 3.17. Как видно из этой таблицы, увеличение абсолютного значения выходного отрицательного давления модели инфекционной палаты приводит к уменьшению возраста воздуха, что благоприятно влияет на улучшение процесса вентиляции в помещении при использованной схеме. Однако, это в свою очередь приводит к росту модулю скорости больше чем 0.2 м/с, что вызывает появление ощущения сквозняка у пациентов (согласно международному стандарту по эргономике помещений).

Таблица 3.17 - Сравнение возраста и модуля скорости при разных давлениях.

Давление, Па	Пациент 1		Пациент 2	
	Возраст воздуха, с	Модуль скорости, м/с	Возраст воздуха, с	Модуль скорости, м/с
0	473.3110	0.0719	493.4690	0.0712
-4	89.7817	0.2834	108.309	0.2331
-8	74.4209	0.3802	78.3139	0.2910
-12	64.1823	0.5569	76.5528	0.3683
-16	54.0439	0.6411	58.3630	0.4089

Таким образом численно исследовано влияние выходного отрицательного давления модели инфекционной палаты на два взаимоисключающих параметра течения– скорости потока и возраста воздуха в помещении. Обнаружено, что увеличение абсолютного значения отрицательного давления на выходе 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. Проверено, достоверность полученных результатов путем сравнения численных данных для двух термодинамических моделей, основанных на уравнениях переноса энтальпии и внутренней энергии для расчета температуры.
4. 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://vestnikksucta.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. – То же: [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, жылуулуку 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. $k-\omega$ 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 жылуулуку 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.

