

**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 Каныебековна

Численное моделирование струйных турбулентных течений

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек-20__

Диссертационная работа выполнена на кафедре Экспериментальная и теоретическая физика 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: <https://vc.vak.kg/b/012-scz-oh6-lwn>

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), Белов И.А(2001), Гиневский А.С(1969), Купер Д.(1993),Фрик П.Г(2003), Юн А.А(2010).

Проблемы оптимизации кондиционирования воздуха в инфекционных помещениях рассмотрены в работах Г.Гиральдо(2020),Свирин М.В(2023), Хуссейн З.К(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 инфекционной палате Карасуйской территориальной больницы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение аналитического обзора существующих методов численного моделирования турбулентных струйных течений и определение возможных путей их дальнейшего совершенствования.
2. Проверка адекватности используемой математической модели путем численного моделирования пристеночной турбулентной струи.
3. Моделирование влияния числа Рейнольдса падающей турбулентной импактной струи на охлаждение нагревательной пластины.
4. Моделирование влияния интенсивности турбулентности входной струи на движение воздуха в модели помещения.
5. Моделирование влияния отрицательного выходного граничного условия для давления на движение воздуха в модели инфекционной палаты Карасуйской территориальной больницы с учетом теплообмена.

Научная новизна полученных результатов работы.

1. Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с увеличением числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000

повышается вычислительная эффективность численных расчётов при заданной точности. В частности, количество итераций уменьшается на 27.93 %, а время расчёта сокращается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

2. Кроме того, численное моделирование выявило неравномерное распределение средней температуры течения в средней горизонтальной плоскости расчётной области.

3. 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%.

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

5. Показано, что предложенная схема инфекционной палаты с размещением трёх 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 инфекционной палате 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:

- Международная практическая конференция «Вызовы науки», посвященная 75-летию проф., доктора Багдаулета Кенжалиева, Алматы, Казакстан, 15-16 ноября 2023 года.

- Научно-практическая конференция «Развитие PhD докторантуры и научно-исследовательского потенциала Кыргызстана», Бишкек, Кыргызстан, 3-4 ноября 2022 года.

- XXIV Международная научно-практическая конференция «Наука и образование: проблемы и перспективы» - Россия, Алтайский край, 15-апреля 2022 года.

- 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 112 страниц текста, 20 рисунка, 16 таблиц, 67 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:

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

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

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

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

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.

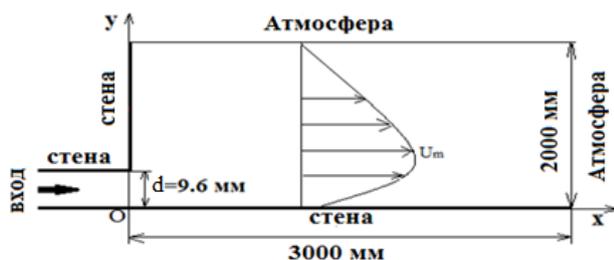


Рисунок 3.1 –Геометрия задачи и границы области

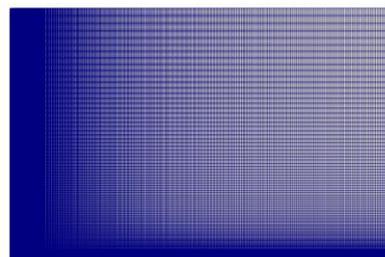


Рисунок 3.2 – Расчетная сетка

Длина расчетной $l=3$ м, ширина 2 м и высота щели, из которой вытекает плоская струя воды, равна 9.6мм. Число Рейнольдса, определяемое через среднее значение входной продольной скорости $U_0 = 1$ м/с, коэффициента кинематической вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с и ширины щели $d=0.0096$ м равно $Re = \frac{U_0 d}{\nu} = 9600$.

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

Численная модель. На верхней границе, обозначенной на рисунке 3.1 «Атмосфера», задается условие «общее давление» для газодинамических функций. Условия для давления аналогичны условиям для входной границы «вход». 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.

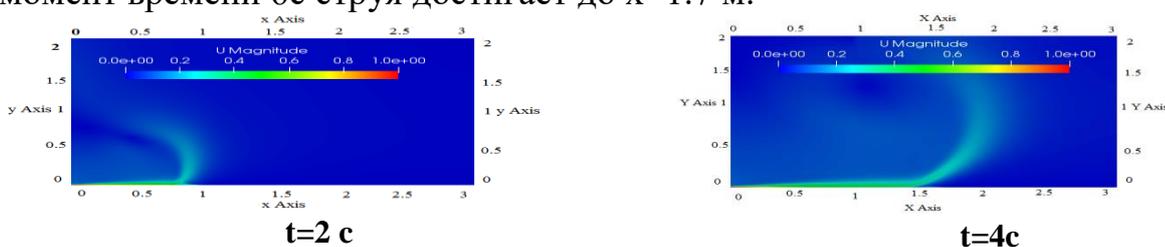
Влияние турбулентности на течение жидкости – воды, внутри расчетной области учитывается посредством kOmegaSST модели турбулентности.

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 проведена 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.



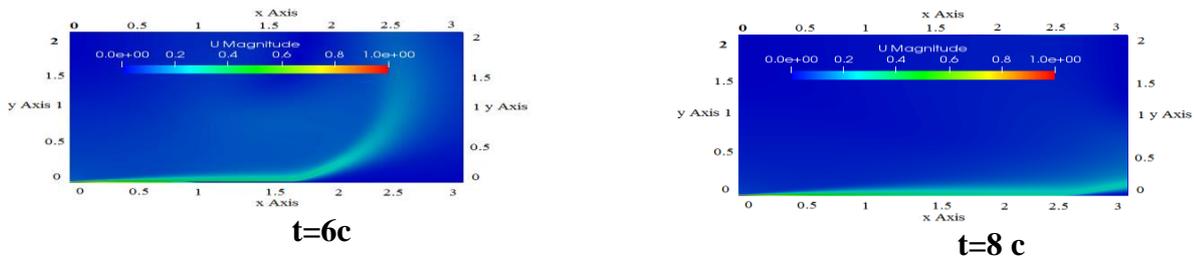


Рисунок 3.3– Поля модуля скорости

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 Eriksson J; Karlsson R.I; Persson J(1998), сплошная линия - численные результаты данной работы.

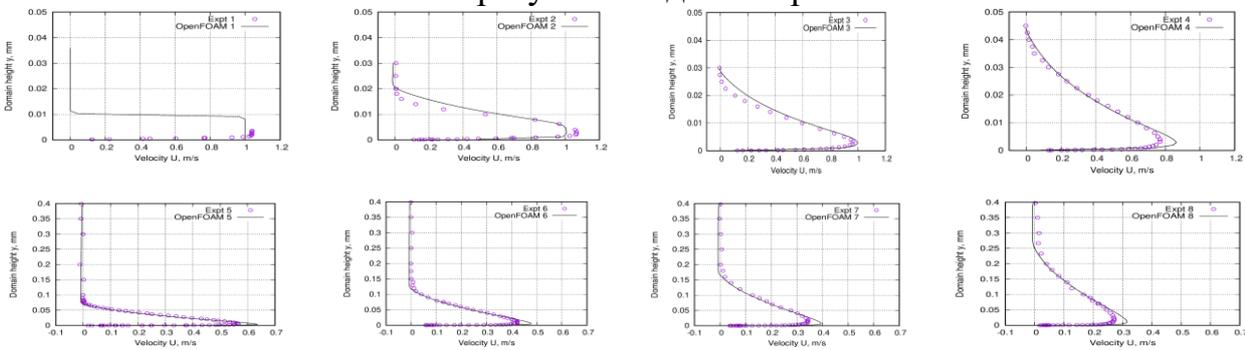


Рисунок 3.4– Вертикальные профили продольной скорости в разных сечениях

Как видно на рисунке 3.4, соответствие между расчётными и экспериментальными данными по поперечным профилям продольной скорости можно признать достаточно хорошим. До сечения $x=0.048\text{м}$, максимальная скорость в расчетах занижена на 8%. В сечении $x=0.096\text{м}$ соответствие хорошее, а далее вниз по течению расчет дает завышенное 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
$x=0\text{м}$	$x=0.048\text{м}$	$x=0.096\text{м}$	$x=0.192\text{м}$	$x=0.384$ М	$x=0.672\text{м}$	$x=0.960\text{м}$	$x=1.440\text{м}$
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%.

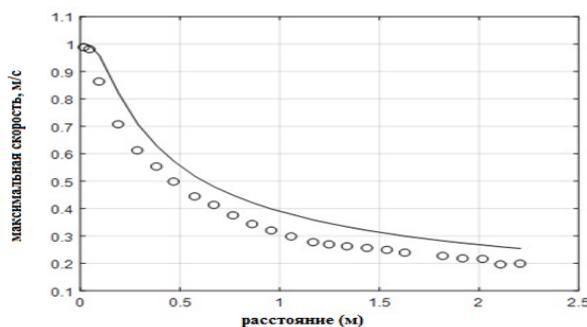


Рисунок 3.6—Продольный профиль максимальной скорости пристеночной струи

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 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 3.7а 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 $z = 0.1\text{м}$ представлена на рис. 3.7б.

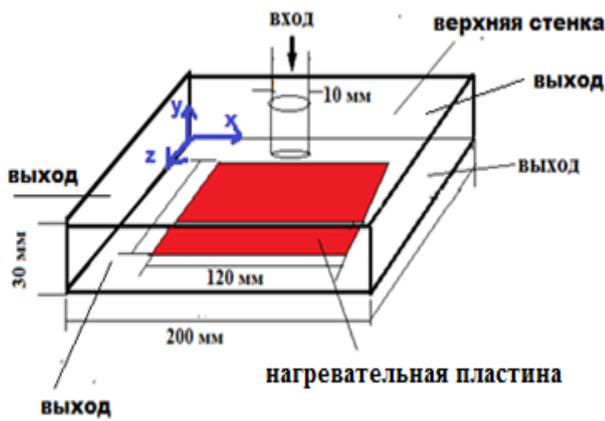


Рисунок 3.7а–Геометрия расчетной области

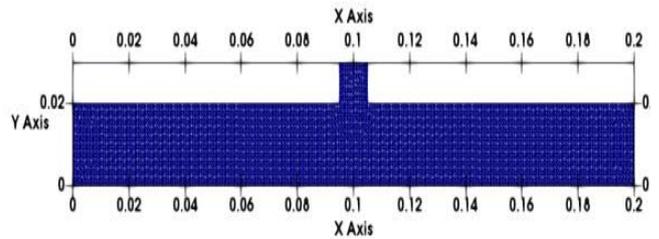


Рисунок 3.7б–Расчетная сетка

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} .

Результаты численных расчетов и обсуждение. 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 расчетная сетка с общим числом 1 261 230 ячеек, и представленные ниже численные результаты соответствуют именно этой расчетной сетке.

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 м/с, 26 м/с, 39 м/с) числах Рейнольдса падающей турбулентной струи 8000, 16000, 24000.

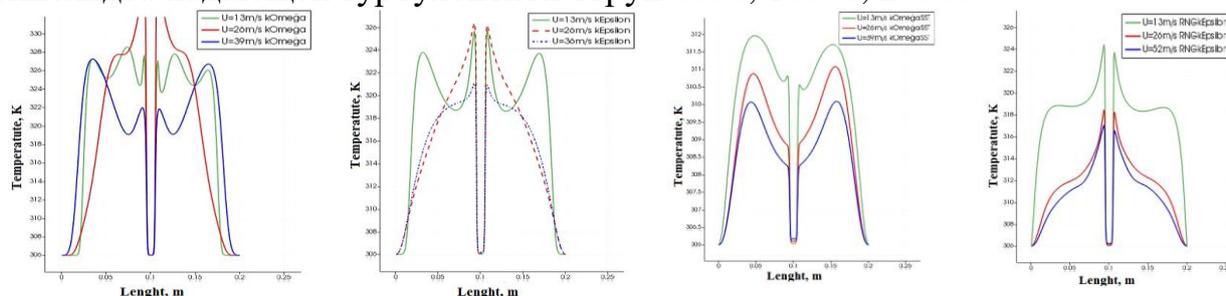


Рисунок 3.8–Распределения поля скорости для разных моделей турбулентности

Видно, что точка с минимальной температурой $T=306$ 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.

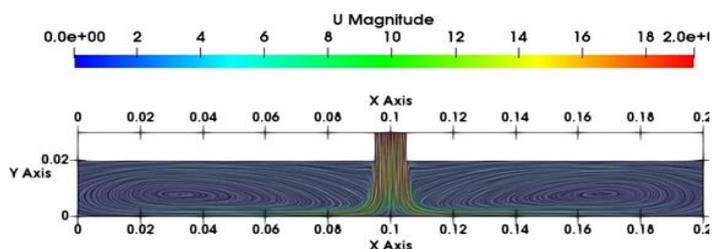


Рисунок 3.9 – Изолинии модуля скорости в плоскостиз=0.1 м

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. 3.6 б 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 3.6б–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 числа 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 3.7б с 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.

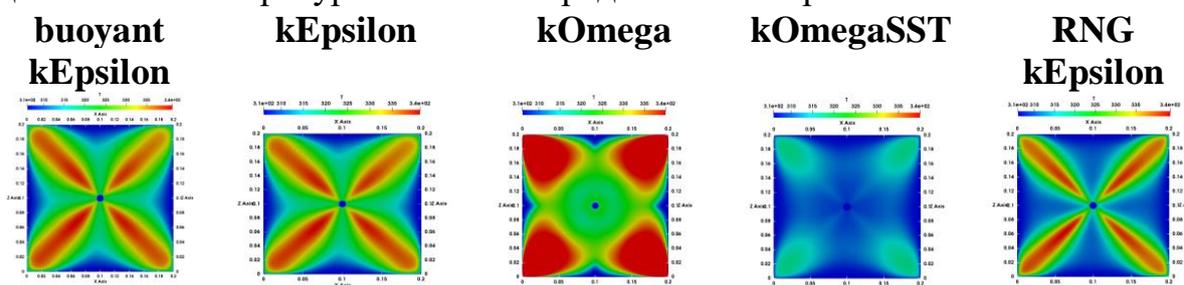


Рисунок 3.10–Распределение температурного поля на поверхности при входной скорости 39м/с.

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 $\rho=1.204$ кг/м³, коэффициентами динамической $\mu = 1.82 \times 10^{-5}$ Па·с и кинематической $\nu = 1.51 \times 10^{-5}$ м²/с вязкостью. Турбулентный поток воздуха входит в модели помещения со скоростями $u_0 = 1.3$ м/с (рис. 3.11а) и $u_0 = 0.455$ м/с (рис. 3.11б).

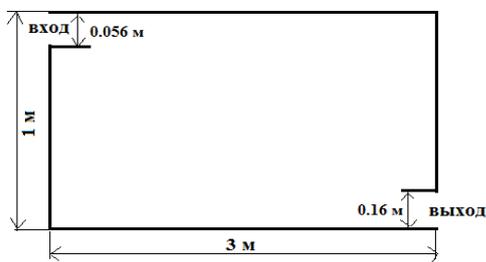


Рисунок 3.11а-Геометрия модели 3м×1м×1м

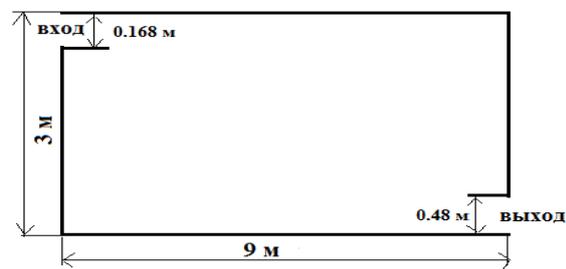


Рисунок 3.11б-Геометрия модели 9м×3м×1м

Высота первой модели $H=1$ м, в второй модели $H=3$ 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 соответствующим 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 искомым 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 трех 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 струи выходит из области, а основная часть движется в сторону левой стенки.

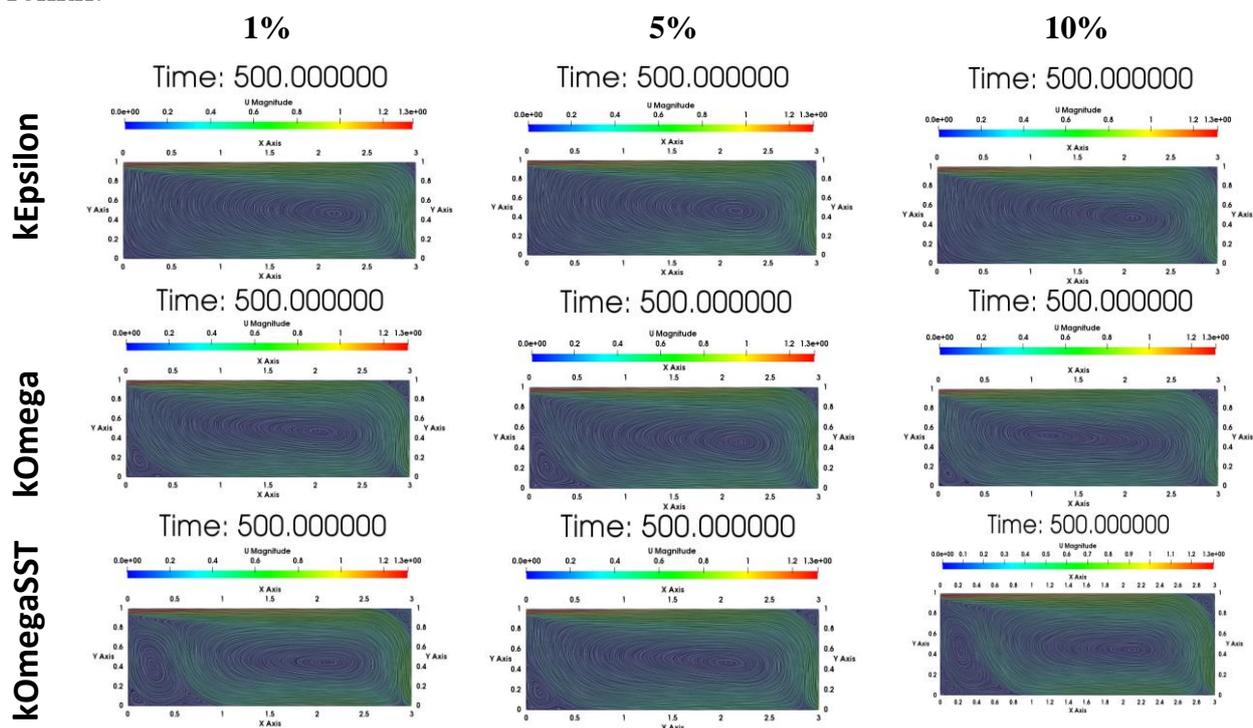


Рисунок 3.12- Изолинии модуля скорости при разных моделях и при разных интенсивностях

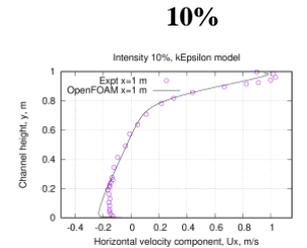
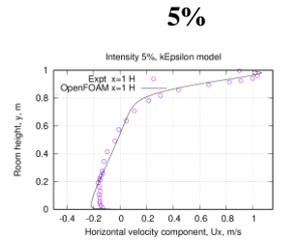
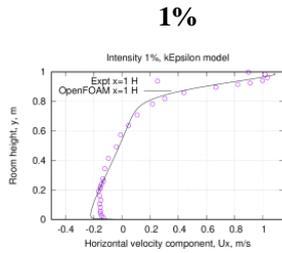
На следующих рисунках показано сравнение вертикальных профилей продольной скорости в двух сечениях $x=1H$ (рис. 3.13) и $x=2H$ (рис. 3.14) при трех значениях интенсивности турбулентности входной струи.

модели

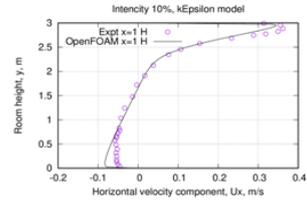
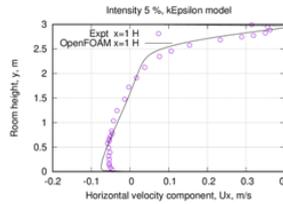
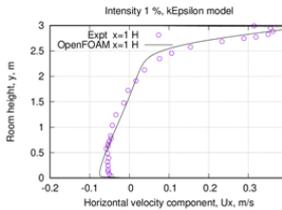
kEpsilon

kOmegaSST

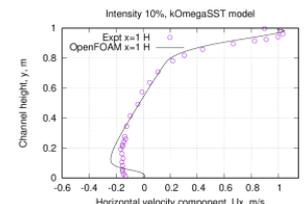
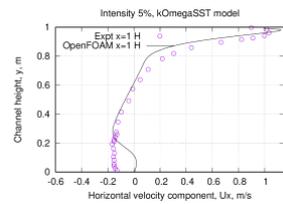
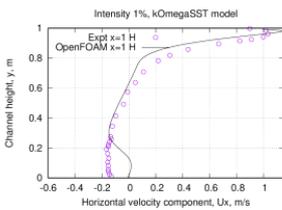
3x1
1H



9x3
1H



3x1
1H



9x3
1H

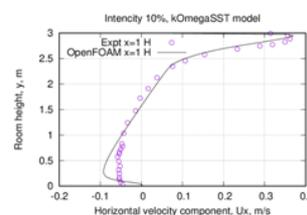
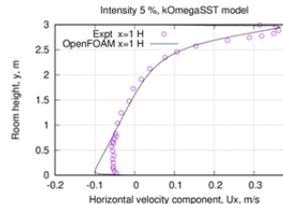
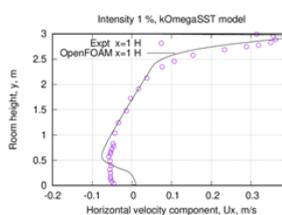
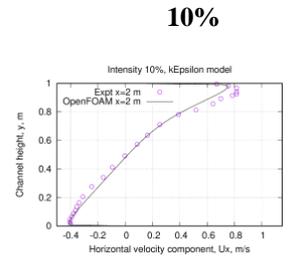
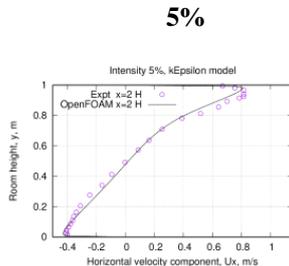
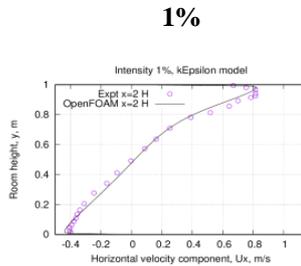


Рисунок 3.13–Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=1H$.

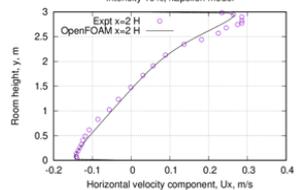
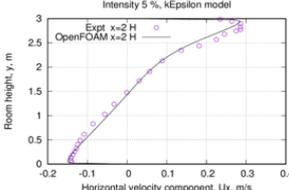
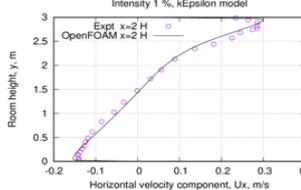
kEpsilon

kOmegaSST

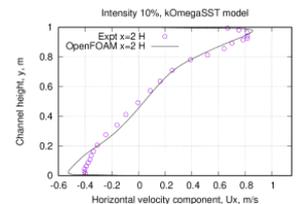
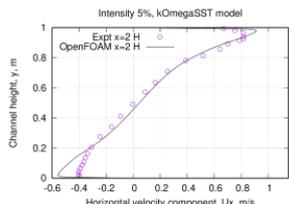
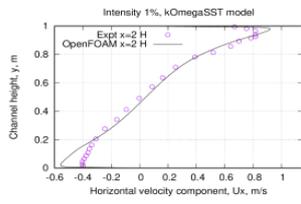
3x1
2H



9x3
2H



3x1
2H



9x3
2H

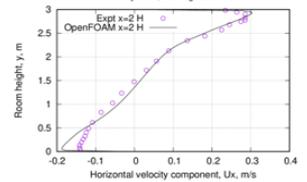
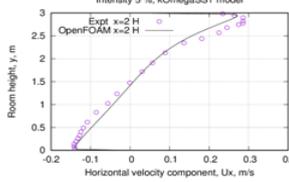
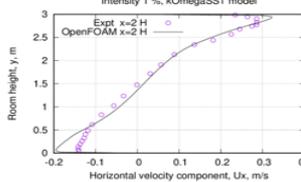


Рисунок 3.14–Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=2H$.

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. Моделирование движения воздуха в модели инфекционной палаты

Цель данной задачи заключается в изучении влияния отрицательного выходного давления воздушного потока на поле скорости воздуха в инфекционной палате Карасуйской территориальной больницы размерами: длина — 6 м, ширина — 4 м, высота — 2.6 м (см. рис. 3.15).

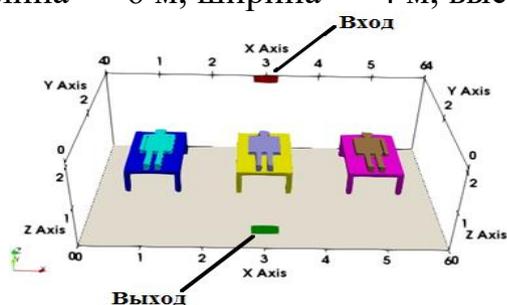


Рисунок 3.15а – Модель инфекционной палаты с тремя пациентами

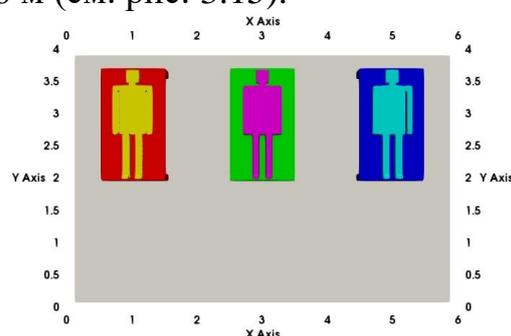


Рисунок 3.15б – Схема расположения пациентов

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 выходной границы расположен на передней стенке в точке с координатами (3, 0, 0.5). Поток атмосферного воздуха с температурой 295.15 К поступает в расчётную область с минимальной скоростью и выходит из неё также с минимальной скоростью.

Математическая модель задачи. Уравнение (1-4).

Численная модель. Дискретизация расчётной области выполнена с использованием стандартных утилит *blockMesh* и *snappyHexMesh* открытого пакета *OpenFOAM*. Дискретизация системы основных 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 через выходное отверстие, на котором установлено отрицательное давление. На рисунках 3.16–3.17 представлены поля

векторов скорости для двух значений выходного давления: $P_{out}=0$ Па (рис.3.16) и $P_{out}=-4$ Па (рис. 3.17). Снижение граничного условия для давления с $P_{out}=0$ Па до $P_{out}=-4$ Па приводит к существенным изменениям картины течения в модели палаты.

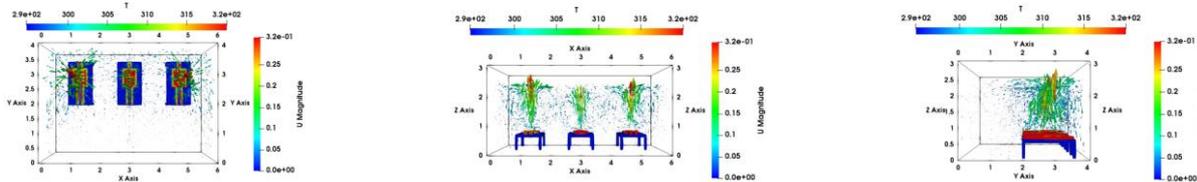


Рисунок 3.16 -Поле вектора скорости при давлении $P_{out} =0$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа).

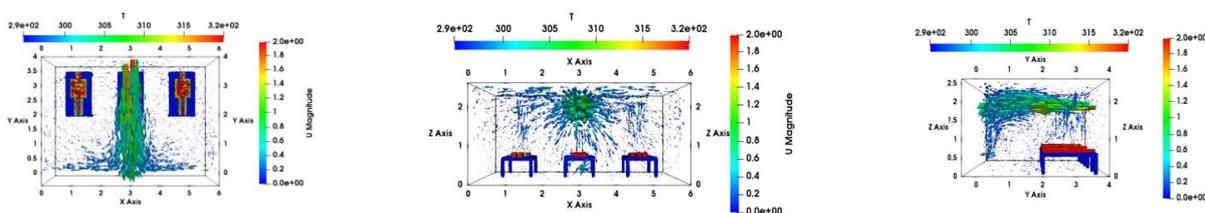
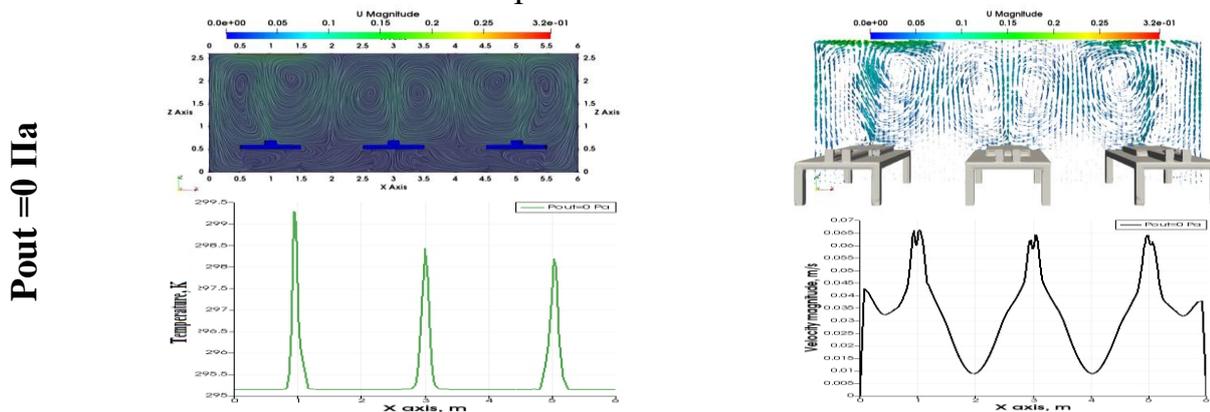


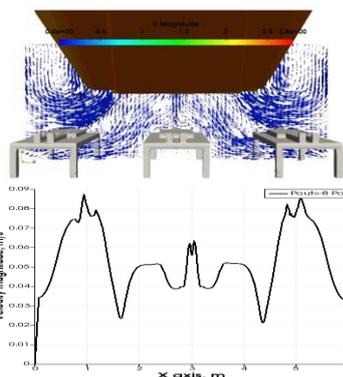
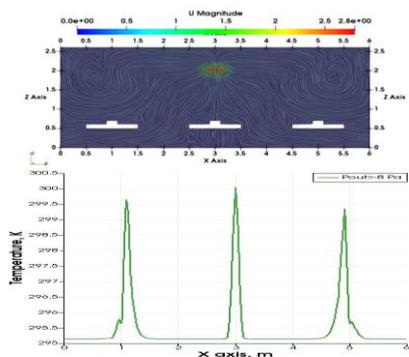
Рисунок 3.17-Поле вектора скорости при давлении $P_{out}= -4$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа).

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. 3.18, 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. 3.18. При $P_{out}=0$ Па наблюдается образование конвективных ячеек Рэлей-Бенара.



Pout = -8 Па



Pout = -16 Па

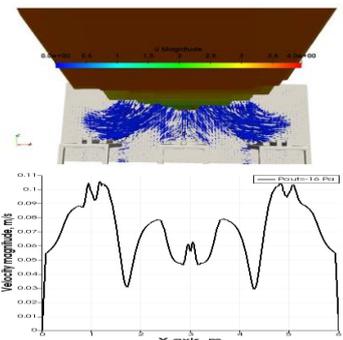
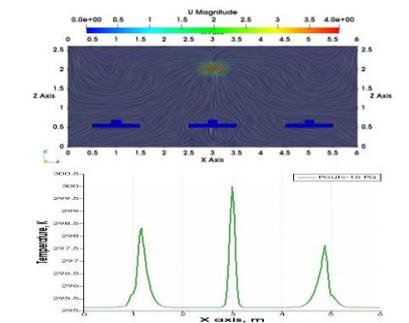


Рисунок 3.18 – Изолинии и поле скорости, профили температуры и скорости.

Сравнение этих графиков показывает смещение максимумов температуры потока около левых и правых стенок в сторону центральной части палаты по сравнению с случаем чистой свободной конвекции ($P=0$ Па). При этом величина смещения увеличивается с ростом отрицательного выходного давления.

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 3.19–3.20 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.

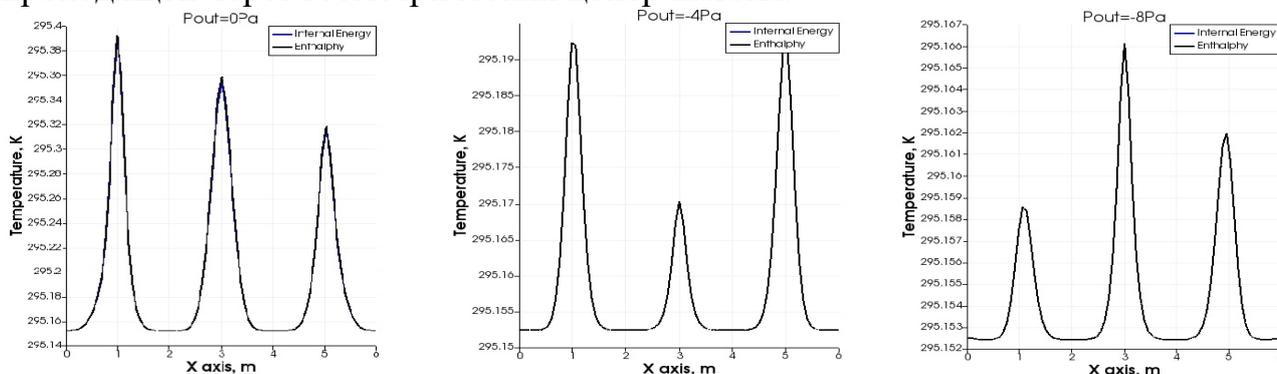


Рисунок 3.19- Профиль температуры при разных давлениях

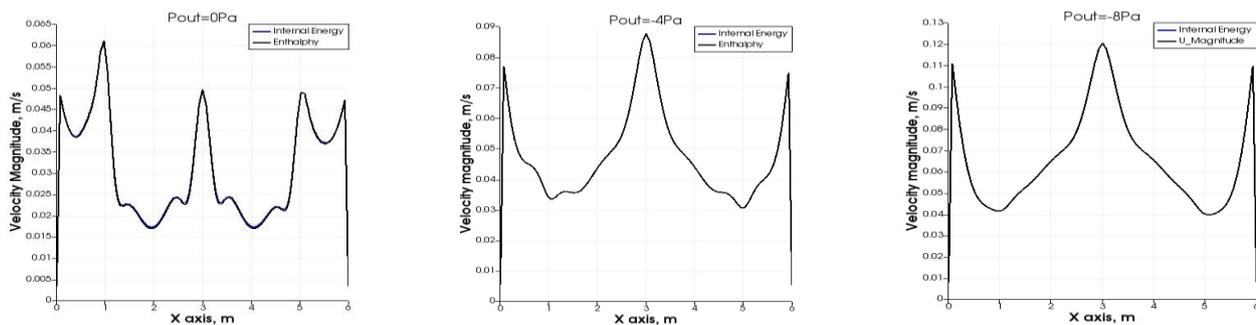


Рисунок 3.20-Профиль модуля скорости при разных давлениях

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.

Сравнены две термодинамические модели 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.

Видно, что модуль скорости превышает 0.2 м/с до передней стенки. Поэтому пациенты должны располагаться дальше от передней стенки: расстояние от пациента до передней стенки должно быть больше 1 м, а у нас это расстояние равно 2 м. Входная струя воздуха, не теряя импульса, доходит до стенки, ударяется об неё и направляется вниз, к полу палаты. Модуль скорости около этой стенки составляет более 0.45 м/с. Поэтому пациенты должны располагаться дальше от передней стенки. При выбранной схеме расположения трёх пациентов предложенная схема инфекционной палаты обеспечивает необходимый скоростной комфорт.

Было установлено, что наиболее комфортная скорость воздушного потока, составляющая менее 0.2 м/с, соответствует требованиям международного стандарта эргономики помещений.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приведены основные результаты и выводы диссертации.

В 4 ПРИЛОЖЕНИЯХ приведены 2 акта внедрения, 2 авторских свидетельства, 4 сертификата об участии в различных конференциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с увеличением числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчётов при заданной точности. В частности, количество итераций уменьшается на 27.93

%, а время расчёта сокращается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

2. Кроме того, численное моделирование выявило неравномерное распределение средней температуры течения в средней горизонтальной плоскости расчётной области.

3. 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%.

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

5. Показано, что предложенная схема инфекционной палаты с размещением трёх 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 Международный Азиатской школы-семинар.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. – 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>

РЕЗЮМЕ

диссертационной работы 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, охлаждения, 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 инфекционной палате Карасуйской территориальной больницы.

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

Научная новизна полученных результатов работы.

- Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с увеличением числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчётов при заданной точности. В частности, количество итераций уменьшается на 27.93 %, а время расчёта сокращается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

- Кроме того, численное моделирование выявило неравномерное распределение средней температуры течения в средней горизонтальной плоскости расчётной области.

- 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%.

- Впервые проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления на организацию движения воздуха в модели инфекционной палаты с отрицательным давлением Карасуйской территориальной больницы. Установлено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при отрицательных значениях выходного давления -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.

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

Ачкыч сөздөр: турбуленттүү агым, жылуулук өткөрүмдүүлүк, муздатуу, түшүү агымы, дубал агымы, buoyantSimpleFoam, OpenFOAM.

Изилдөөнүн объектиси: турбуленттүү струялык агым.

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

Изилдөөнүн максаты Кара-Суу аймактык ооруканасынын инфекциялык бөлмөсүндөгү аба кыймылынын мисалын колдонуу менен OpenFOAM тиркеме пакетинин алкагында турбуленттүү струялык агымдарды моделдөө ыкмасын иштеп чыгуу болуп саналат.

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

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы.

- Жылытуу пластинасын муздатуу процессин моделдештирүүдө сокку уруучу агымдын Рейнольдс саны 8000ден 48000ге чейин көбөйөт, алдын ала аныкталган тактыктагы сандык эсептөөлөрдүн эсептөө эффективдүүлүгү жогорулайт, тактап айтканда, кайталоолордун саны 27,93%га азаят жана эсептөө убактысы buoyantkEpsilon турбуленттүүлүгү модели үчүн 27,82% га төмөндөйт.

- $3 \times 1 \times 1$ 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.

- Кара-Суу аймактык ооруканасында терс басымдагы инфекциялык бөлүмдү вентиляциялоону уюштурууда биринчи жолу басымга чыгуу чектик шартынын таасирин сандык моделдөө жүргүзүлдү. Орточо ылдамдык профили -8Па жана -

16Па терс чыгуу басымында нөлдүк чыгуу басымына салыштырмалуу 6% жана 24% көбөйөрү аныкталган.

- Үч бейтаптан турган инфекциялык палата үчүн сунушталган желдетүү схемасы талап кылынган ыңгайлуулукту камсыздай тургандыгы көрсөтүлгөн - ылдамдыгы 0,2 м/с ашпайт.

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.

SUMMARY

**dissertation work of Zeinura Kanybekovna Abdimutalipova
on the topic: “Numerical modeling of jet turbulent flows” for the degree of
candidate of physical and mathematical sciences in specialty 01.02.05 –
“Mechanics of liquid, gas and plasma”**

Keywords: turbulent flow, thermal conductivity, cooling, incident 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 and equipment. Numerical integration of stationary and nonstationary, Reynolds-averaged three-dimensional Navier-Stokes equations describing turbulent jet flows.

Scientific novelty of the obtained results.

- It is shown that when modeling the cooling process of the heating plate with an increase in the Reynolds number of the impact jet from 8,000 to 48,000, the computational efficiency of numerical calculations with a predetermined accuracy increases, namely, the number of iterations decreases by 27.93% and the calculation time decreases by 27.82% for the buoyantkEpsilon turbulence model .

- 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- ω SST model is worst at an intensity of 5%.

- For the first time, numerical modeling of the influence of the output boundary condition for pressure was carried out when organizing ventilation of the infectious disease ward with negative pressure at the Karasu Territorial Hospital. The average

velocity profile was found to increase by 6% and 24% at -8Pa and -16Pa negative outlet pressures compared to zero outlet pressure.

- It is shown that the proposed ventilation scheme for an infectious diseases ward of three patients provides the required speed comfort - the 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 Karasu Territorial Hospital in order to optimize air movement in the model of infectious diseases wards with negative pressure.

