

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

Кыргызско-Российский Славянский университет имени Б. Ельцина

Диссертационный совет Д 01.22.652

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-2024

Диссертационная работа выполнена на кафедре Экспериментальная и теоретическая физика Ошского государственного университета

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

Официальные оппоненты: **Бийбосунов Алмаз Ильясович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор представительство ООО «Газпром проектирование» в КР.

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

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

Защита состоится «14» июня 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного Совета Д 01.22.652 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 актовй 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 «13» мая 2024г.

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



Кожошов Т.Т

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 нестационарных/стационарных 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).

В данной работе изучено влияние выходного отрицательного граничного условия для давления на процессе вентиляции 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 вентиляции больничной палаты инфекционного отделения 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 усовершенствования.
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 процесс вентиляции модели помещения.
5. Моделирование влияния отрицательного выходного граничного условия для давления на процессе вентиляции модели инфекционной палаты Карасуйской территориальной больницы с учетом теплообмена.

Научная новизна полученных результатов работы.

1. Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с ростом числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчетов с наперед

заданной точностью, а именно число итераций уменьшается на 27.93 % и время расчета уменьшается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

2. Кроме того, численным моделированием обнаружено не равномерное распределение средней температуры течения в средней горизонтальной плоскости расчетной 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 экспериментом и численным расчетом для модели $k-\omega$ SST является наилучшей при интенсивности 5%.

4. Впервые было проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления при организации вентиляции инфекционной палаты с отрицательным давлением Карасуйской территориальной больницы. Обнаружено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при -8Па и -16Па отрицательных значениях выходного давления по сравнению с нулевым выходным давлением.

5. Показано, что при предложенной схеме вентиляции инфекционной палаты из трех пациентов обеспечивается нужный скоростной комфорт - скорость 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 125 страниц текста, __ рисунка, __ таблиц, __ библиографических ссылок и __ 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 проведен обзор литературы по современным методам моделирования процесса вентиляции помещений с использованием турбулентных струйных течений с учетом 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 исследование влияния эффекта отрицательного граничного условия на вентиляцию инфекционной палаты.

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

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

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

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

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

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

Задача №1. Численное моделирование плоской турбулентной пристенной струи.

Цель этой нестационарной задачи заключается в численном исследовании полей скорости турбулентной пристеночной струи.

Постановка задачи. В данной работе рассмотрено 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.

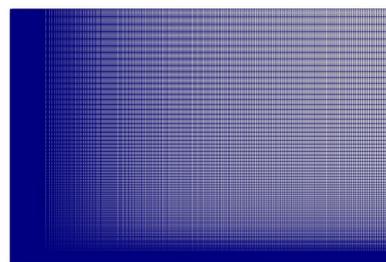
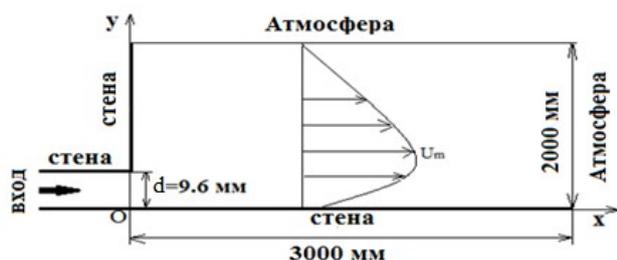


Рисунок 3.1 -Геометрия задачи и границы области

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. 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 нестационарного алгоритма PISO до момента времени 8с с шагом 0.001с. Также была проведено расчеты с применением стационарного 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.

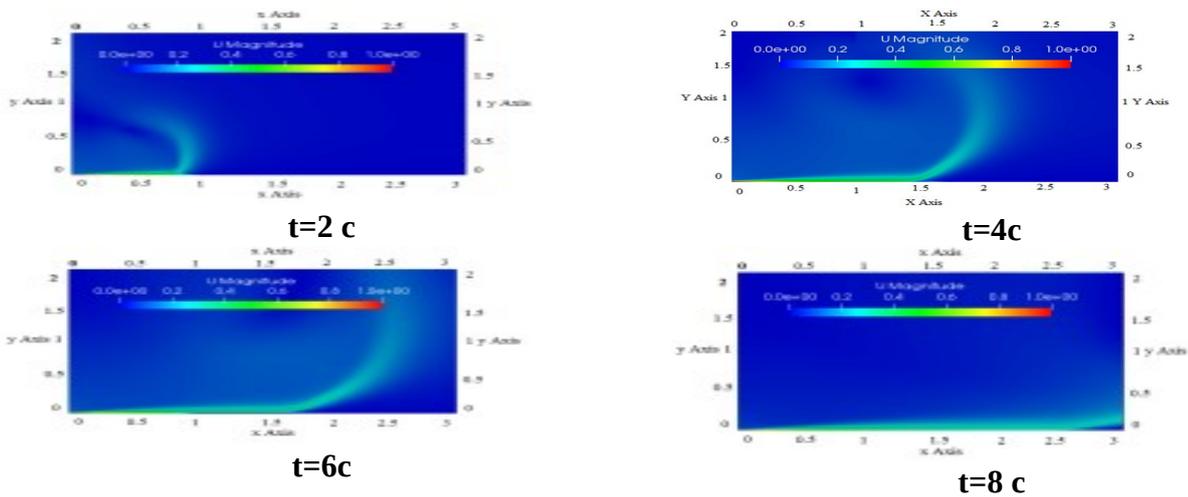


Рисунок 3.3- Поля модуля скорости

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; KarlssonRI; PerssonJ(1998), сплошная линия - численные результаты данной работы.

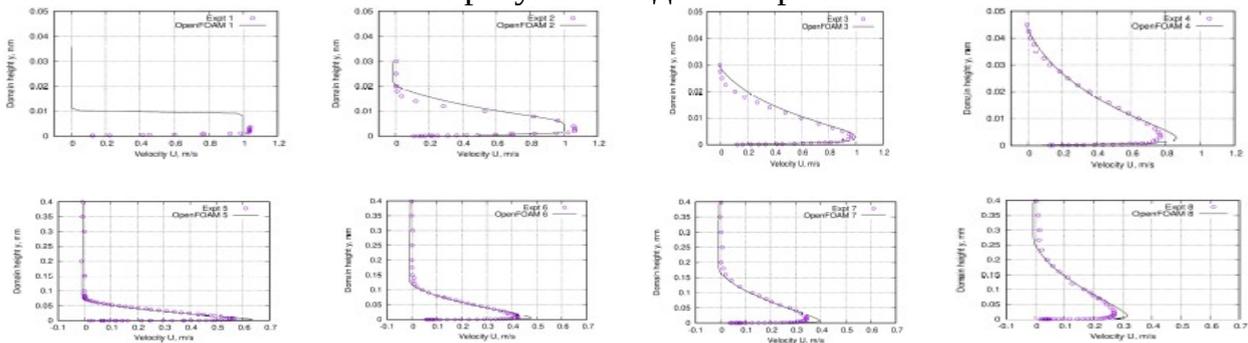


Рисунок 3.4- Вертикальные профили продольной скорости в разных сечениях

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

Это видно из таблицы 3.4, где приведены расхождения между результатом численных расчетов и соответствующими экспериментальными данными по поперечным профилям продольной скорости в восьми сечениях.

Таблица 3.4-Сравнение численных расчетов с экспериментальными данными

1	2	3	4	5	6	7	8
$x=0\text{м}$	$x=0.048$ м	$x=0.096\text{м}$	$x=0.192$ м	$x=0.384$ м	$x=0.672\text{м}$	$x=0.960$ 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 расчетов и соответствующими экспериментальными данными по максимальной скорости пристеночной струи составляет примерно 5%.

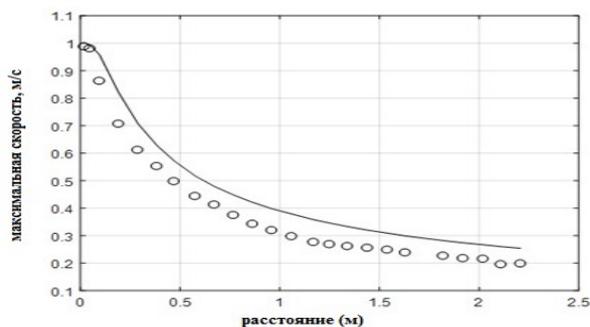


Рисунок 3.6-Продольный профиль максимальной скорости пристеночной струи

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 в достаточной высокой степени точности указывают на то, что использованная математическая модель является достоверным и ее можно применять для моделирования процесса вентиляции палаты больницы струйным течением.

Задача №2. Численное моделирование охлаждения нагревательной пластины импактной струей.

Целью данной стационарной задачи является изучение влияния числа Рейнольдса падающей турбулентной струи воздуха на процесс охлаждения. При этом очень важным моментом для диссертационной работы является вопрос проверки адекватности математической модели процесса теплообмена между нагретой пластины и струей воздуха.

Постановка задачи. Схема моделируемой задачи и границы расчетной 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 расчетная сетка, вертикальном разрезе при $z=0.1$ м представлена на рис. 3.7б.

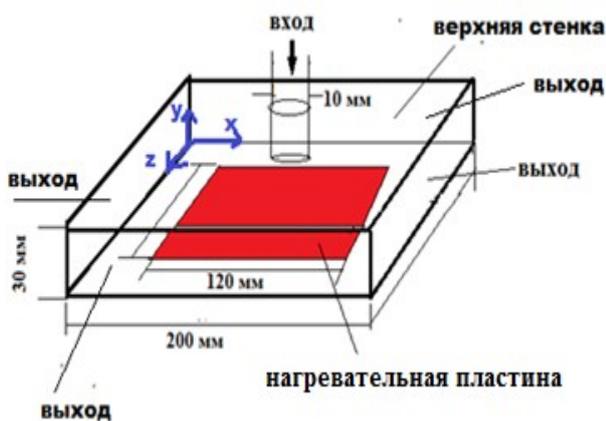


Рисунок 3.7а-Геометрия расчетной области

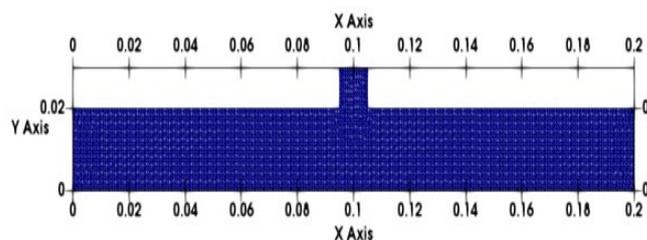


Рисунок 3.7б-Расчетная сетка

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 так как задача является стационарной. 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. Граничные условия для температуры на нагревательной пластине задается следующим образом.

Перед экспериментом стояла задача охлаждения нагревательной пластины, которая производит постоянный равномерный тепловой поток мощностью 3472.22 Вт/м². Для учета 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 $\nabla T = q / \lambda = 3472.22 / 0.02699298 = 128634.09$ 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

становиться 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 точностью численных решений, наиболее подходящей оказалась расчетная сетка с общим числом 1 261 230 ячеек, и представленные ниже численные результаты соответствуют именно к 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 Oх, соединяющая точки с координатами (0, 0.015, 0.1) и (0.2, 0.015, 0.1) при различных значениях (13м/с, 26м/с, 39м/с) числа Рейнольдса падающей турбулентной струи 8000, 16000, 24000.

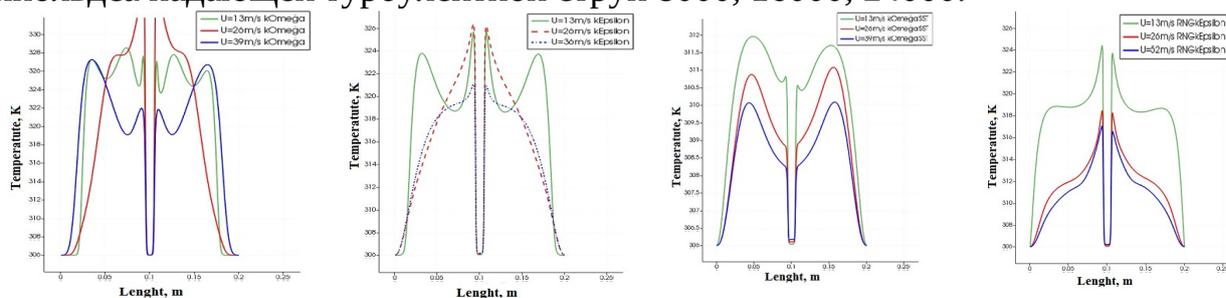


Рисунок 3.8-Распределения поля скорости для разных моделей турбулентности

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.

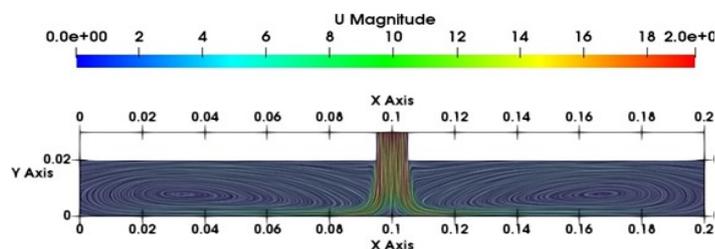


Рисунок 3.9 – Изолинии модуля скорости в плоскости $z=0.1$ м

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

Проведенные систематические расчеты (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 расчетов для разных числах Рейнольдса

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

Число Рейнольдса	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 расчетов с наперед заданной точностью, а именно число итераций уменьшается на 27.93 % и время расчета уменьшается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности. Для kOmegaSST модели турбулентности эти величины составляют 61.30% и 64.63% соответственно.

На основе проведенных систематических расчетов, получено неравномерное распределение поля температуры воздуха на плоскости средней высоты рабочей области, что видно на рис. 3.10, где представлены поле температуры на средней высоте расчетной области.

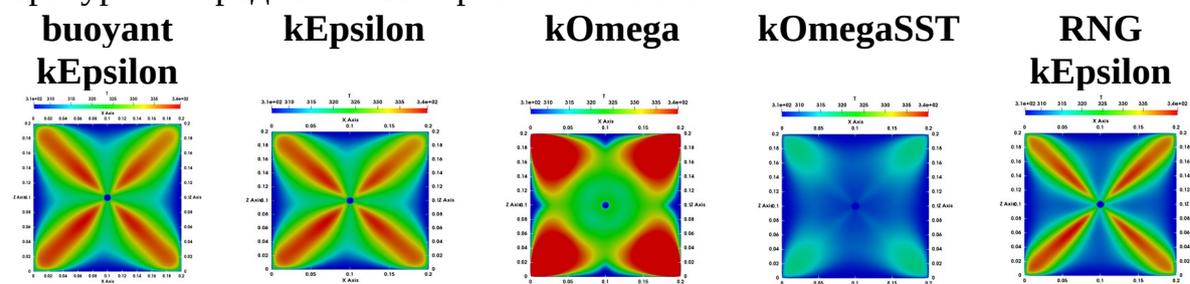


Рисунок 3.10-Распределение температурного поля на поверхности при входной скорости 39м/с

Из рассмотренных моделей 4 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 точках с точностью не более 1.12%, что свидетельствует об адекватности тепловой модели этой задачи, и о возможности ее применения в задаче моделирования вентиляции инфекционной палаты.

Задача №3. Моделирование влияния интенсивности турбулентности входной струи на процесс вентиляции модели помещения.

Цель 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 нестационарное изотермическое движение воздуха, описываемое моделью газа с постоянными физическими свойствами: плотностью $\rho=1.204$ 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).

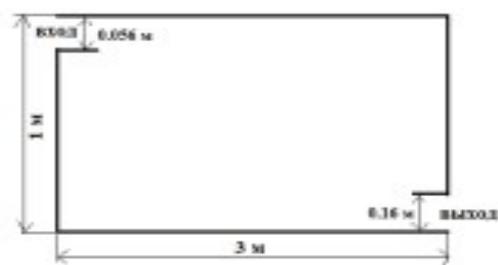


Рисунок 3.11а-Геометрия модели 3м×1м×1м

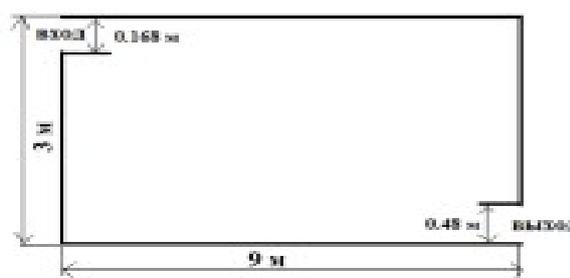


Рисунок 3.11б-Геометрия модели 9м×3м×1м

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 А.М. (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 с соответствующим моделями турбулентности kEpsilon, kOmega, kOmegaSST, kEpsilonRNG.

Численная модель. На входе в расчетную область заданы экспериментальные значений входной продольной скорости. На выходной границе был задан нулевой продольный градиент для всех искомым переменных. Остальные границы расчетной 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 использование известной процедуры PISO.

Результаты численных расчетов и обсуждение. Структура течения воздуха представлена на рисунке 3.12, на котором показаны изолиния модуля скорости для каждой турбулентной модели при одинаковых моментах времени. Сетка во всех трех случаях одинакова, а это означает, что разницу в потоке можно объяснить моделями турбулентности, используемыми для прогнозирования двумерного потока и интенсивности турбулентности при 1%, 5% и 10%. Как видно, турбулентная струя воздуха ударяется об правую стенку и идет вниз, а затем часть струи выходит из области, а основная часть двигается в сторону левой стенки.

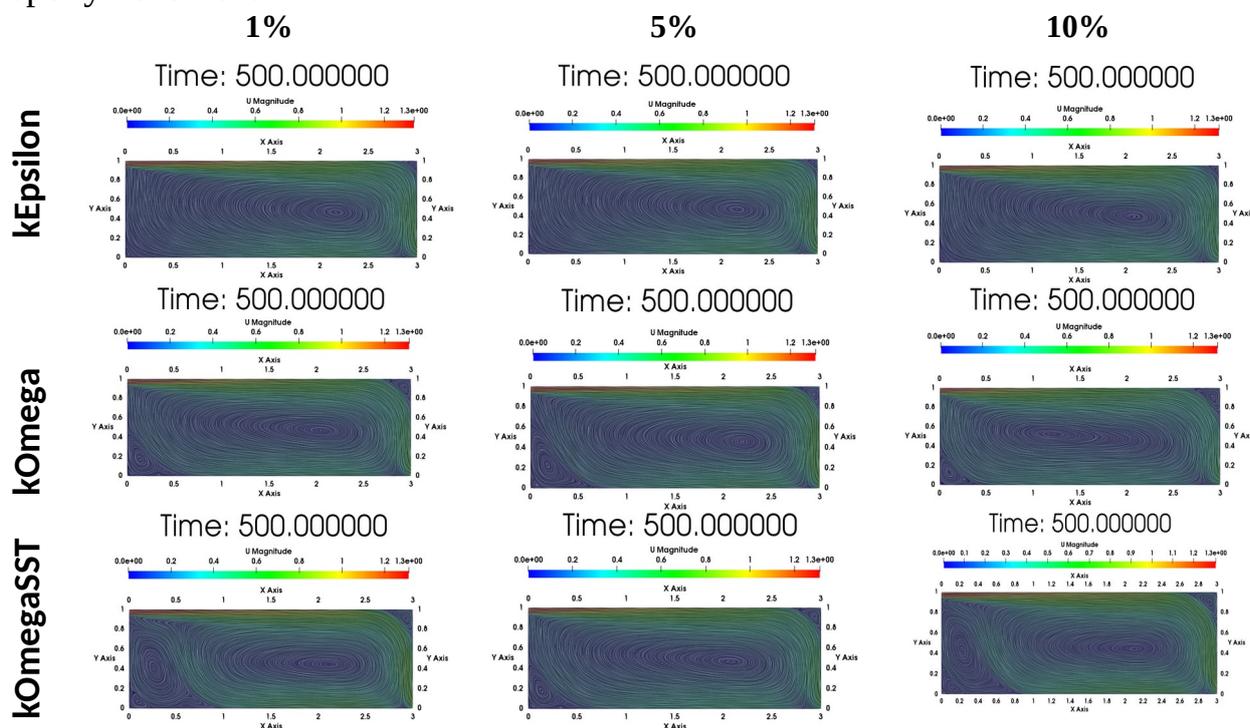


Рисунок 3.12- Изолинии модуля скорости при разных моделях и при разных интенсивностях

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

3
×1
1H

9
×3
1H

3
×1
1H

9
×3
1H

1%

5%

10%

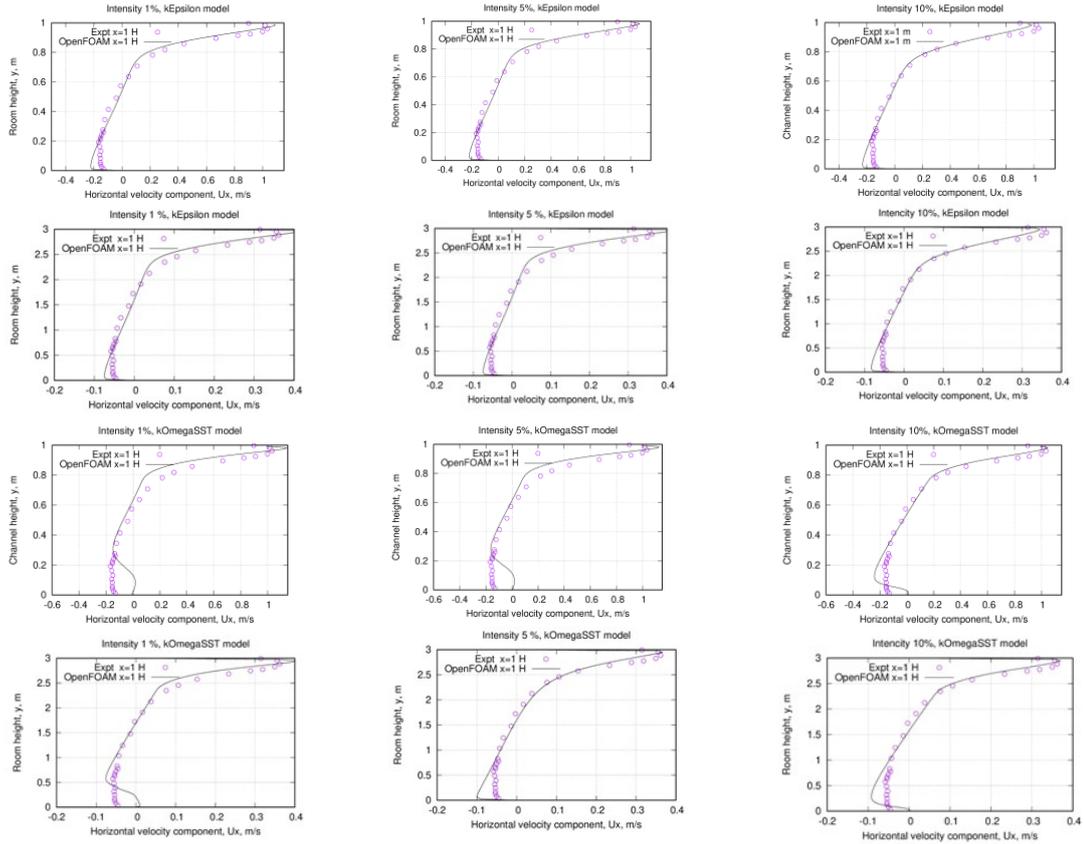


Рисунок 3.13-Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=1H$

kEpsilon

kOmegaSST

3
×1
2H

9
×3
2H

3
×1
2H

9
×3
2H

1%

5%

10%

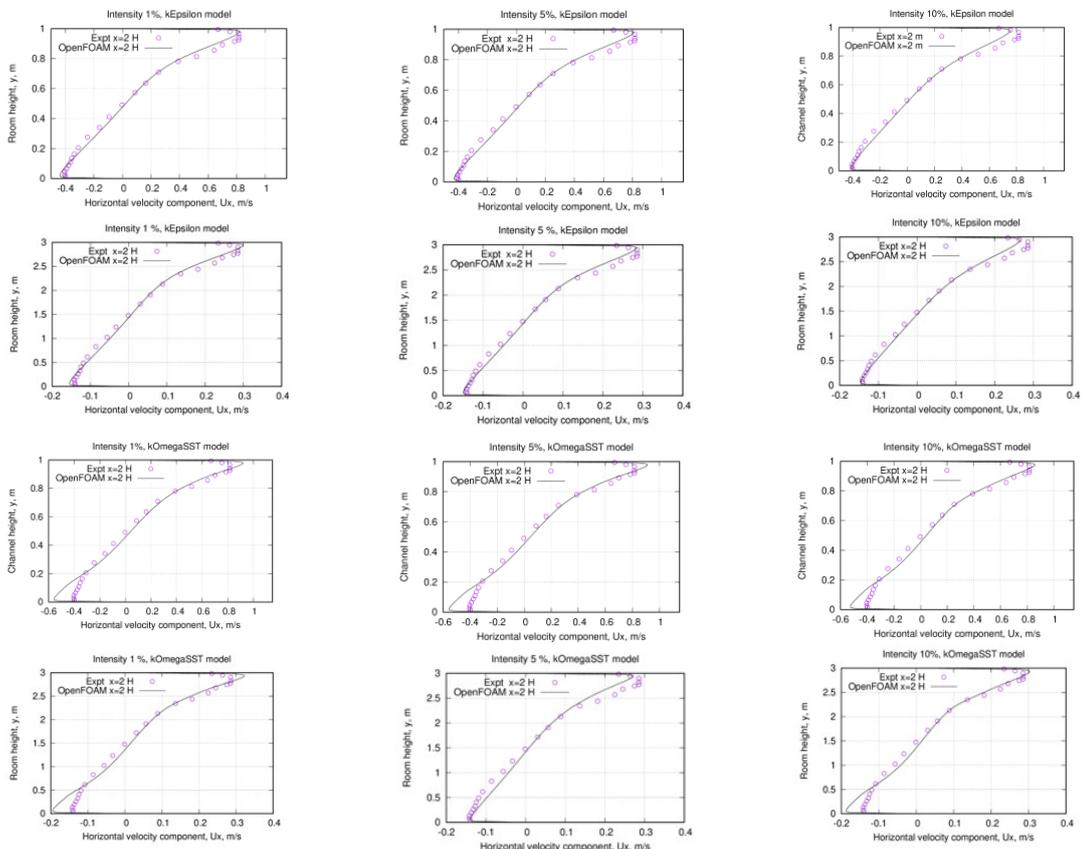


Рисунок 3.14-Вертикальные профили средней скорости в сечении $x=2H$

Как показано на этих рисунках, влияние интенсивности турбулентности входной струи на поле средней скорости течения имеет существенное значение около твердых стенок расчетной области, а в целом совпадение между численными и экспериментальными данными следует признать хорошими.

Соответствие между экспериментом и численным расчетом ухудшается при использовании модели $k-\omega$ SST при интенсивности 5%. При наших расчетах соответствующие погрешности были равны 9.4%.

Задача №4. Моделирование процесса вентиляции модели инфекционного помещения

Цель этой задачи заключается в изучении влияния отрицательного выходного давления потока воздуха на поле скорости воздуха в инфекционной палате Карасуйской территориальной больницы длиной 6м, шириной 4м и высотой 2.6м (см. рис. 3.15).

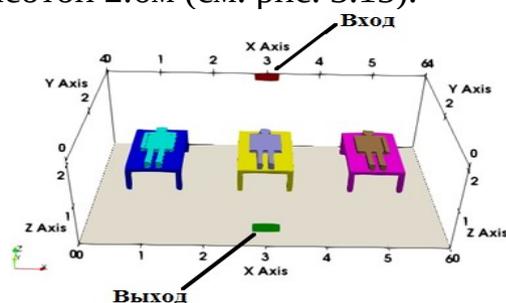


Рисунок 3.15а- Модель инфекционной палаты с тремя пациентами

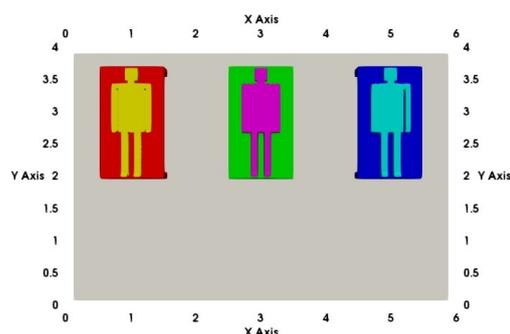


Рисунок 3.15б-Схема расположения пациентов

Начало систем координат расположен в ближнем нижнем углу левой стенки. Выходное и входное отверстие представляют собой прямоугольник размерами 0.5м×0.2м.

Геометрический центр входного отверстия расположен на задней стенке в точке с координатами (3, 4, 2.2), а центр выходной границы располагался на передней стенке в точке с координатами (3, 0, 0.5). Поток атмосферного воздуха с температурой 295.15 К входит в расчетную область с минимальной скоростью, а выходит из нее тоже с минимальной скоростью.

Математическая модель задачи. Уравнение (1-4).

Численная модель. Дискретизация расчетной области получена при помощи стандартной утилиты blockMesh и snappyHexMesh открытого пакета OpenFOAM. Дискретизация системы основных уравнений, представляющие законы сохранения массы, импульса и энергии осуществлена при помощи метода контрольных объемов. Теплообмен между телом пациента и окружающим потоком воздуха в палате осуществляется аналогично задаче-2 посредством граничного условия пакета OpenFOAMexternalWallHeatFluxTemperature при постоянном тепловом потоке мощностью 56.52В/м².

Результаты численных расчетов и обсуждение. Поток атмосферного воздуха с температурой 295.15К входит через входное отверстие с определенной

скоростью и вытекает из модели через выходное отверстие, где задано отрицательное давление. На рисунках 3.16-3.17 приведены поле вектора скорости при двух значениях выходного давления $P_{out}=0$ Па (рис.3.16) и $P_{out}=-4$ Па (рис. 3.17). Уменьшение граничного условия для давления от $P_{out}=0$ Па до $P_{out}=-4$ Па приводит к существенному изменению всей картины течения в модели палаты.

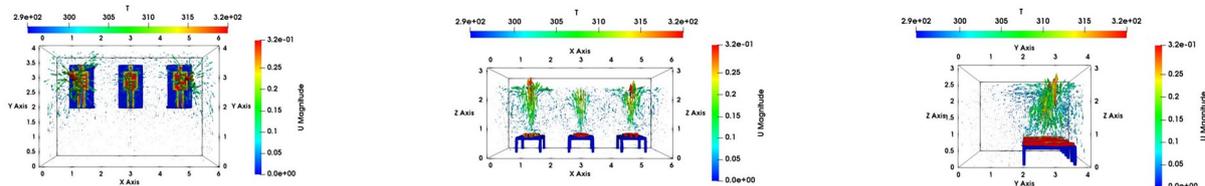


Рисунок 3.16 -Поле вектора скорости при давлении $P_{out} =0$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа)

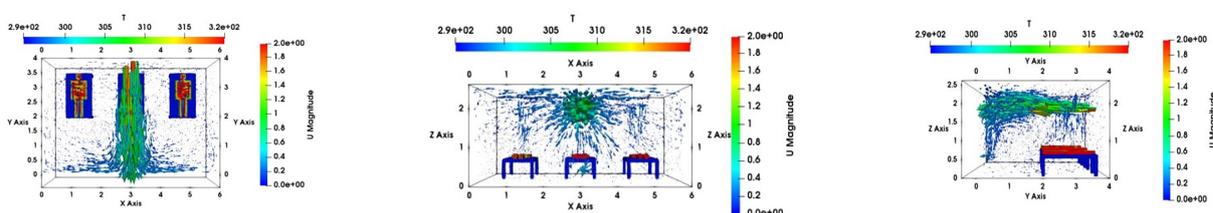
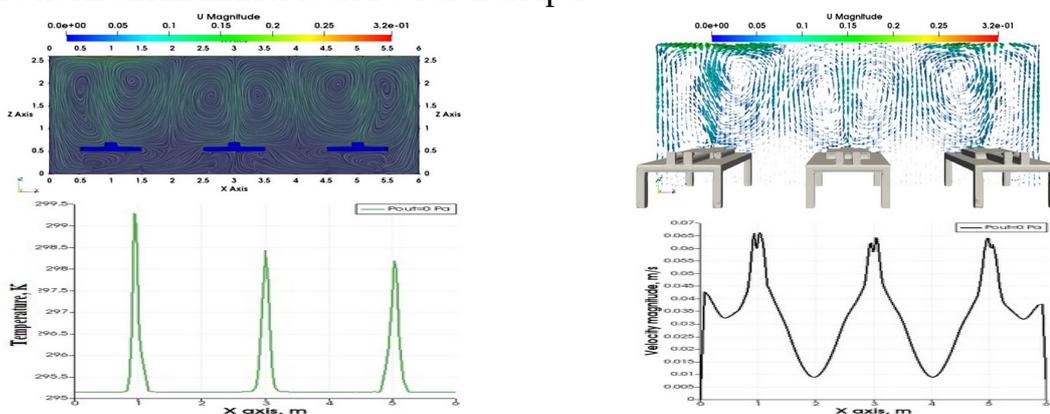


Рисунок 3.17-Поле вектора скорости при давлении $P_{out}= -4$ Па в плоскости XoY (слева), XoZ (в центре) и YoZ (справа)

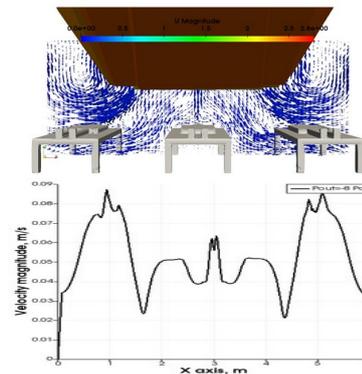
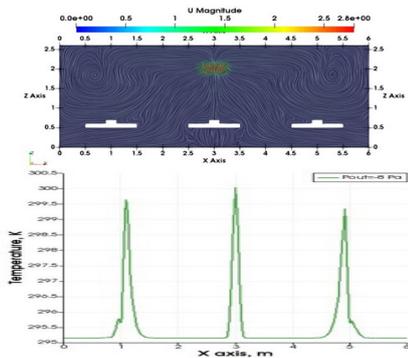
Видно, что происходит перестройка картины течения по всей палате - от свободной конвекции с максимальной скоростью 0.32 м/с до 1.8 м/с. При этом имеет место интенсификация процесса конвекции - свободная конвекция переходит на вынужденную конвекцию, что отчетливо видны из рис. 3.18, где представлены изолинии модуля скорости, поле вектора скорости, горизонтальные профили температуры и скорости на средней высоте платы.

Получен симметричный продольный профиль температуры и модуля средней скорости (вдоль оси Ox) в пределах максимальной ошибки 2.69% и 5.67% соответственно, что видно из рис. 3.18. При $P_{out} =0$ Па можно увидеть образование конвективных ячеек Рэля-Бенара.

$P_{out} =0$ Па



$P_{out} = -8 \text{ Па}$



$P_{out} = -16 \text{ Па}$

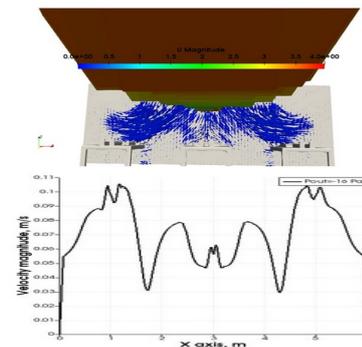
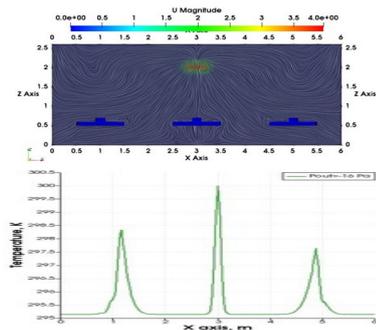


Рисунок 3.18 – Изолинии и поле скорости, профили температуры и скорости

Сравнение этих графиков показывает смещение максимумов температуры потока около левого и правого пациентов в сторону центрального пациента по сравнению с случаем чистой свободной конвекции $P=0 \text{ Па}$. Причем величина смещения растет с ростом отрицательного выходного давления.

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 от $P_{out}=0 \text{ Па}$ до $P_{out} = -16 \text{ Па}$ приводит к существенному изменению всей картины течения в модели палаты. При выбранной схеме расположения трех пациентов предложенная схема вентиляции инфекционной палаты обеспечивает нужный скоростной комфорт - скорость не превышает значения 0.2 м/с согласно международного стандарта по эргономике помещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Проведено моделирование пристенной струи воды в модели помещения. Обнаружено, что при моделировании пристеночной турбулентной струи до сечения $x=0.048 \text{ м}$, максимальная скорость в расчетах занижена на 8%. В сечении $x=0.096 \text{ м}$ соответствие хорошее, далее вниз по течению расчет дает завышенное значения на 10% максимальной скорости. Расхождение между результатом численных расчетов и соответствующими экспериментальными данными по максимальной скорости пристеночной струи составляет примерно 5%.

2. Проведено численное моделирование влияния числа Рейнольдса импактной струи на процесс охлаждения нагревательной пластины. Показано, с ростом числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается

вычислительная эффективность численных расчетов с наперед заданной точностью, а именно число итераций уменьшается на 27.93 % и время расчета уменьшается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности. Обнаружено не равномерное распределение средней температуры течения в средней горизонтальной плоскости расчетной 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 экспериментом и численным расчетом для модели k- ω SST является наилучшей при интенсивности 5%.

4. Впервые было проведено численное моделирование вентиляции инфекционной палаты с отрицательным давлением Карасуйской территориальной больницы. Профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при -8Па и -16Па отрицательных значениях выходного давления по сравнению с нулевым выходным давлением.

5. При выбранной схеме расположения трех пациентов предложенная схема вентиляции инфекционной палаты из обеспечивает нужный скоростной комфорт - скорость не превышает значения 0.2м/с согласно международного стандарта по эргономике помещений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Абдимуталипова З.К.** Имплементация пристеночных функций в пакете OpenFOAM. [Текст] / Курбаналиев А.Б., 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.Б., 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.Б. // 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.Б., 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.Б. // 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.Б., 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.Б. // 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]Web of science//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 исследование влияния эффекта вынужденной конвекции в больничной палате.

Целью исследования является развитие метода моделирования струйных турбулентных течений в рамках прикладного пакета OpenFOAM на примере вентиляции палат Карасуйской территориальной больницы.

Методы исследования и аппаратура. Численное интегрирование стационарных и нестационарных, осредненных по Рейнольдсу трёхмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих струйных турбулентных течений.

Научная новизна полученных результатов работы.

- Показано, что при моделировании процесса охлаждения нагревательной пластины с ростом числа Рейнольдса импактной струи от 8 000 до 48 000 повышается вычислительная эффективность численных расчетов с наперед заданной точностью, а именно число итераций уменьшается на 27.93 % и время расчета уменьшается на 27.82% для buoyantkEpsilon модели турбулентности.

- 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 экспериментом и численным расчетом для модели k- ω SST является наилучшей при интенсивности 5%.

- Впервые было проведено численное моделирование влияния выходного граничного условия для давления при организации вентиляции инфекционной палаты с отрицательным давлением Карасуйской территориальной больницы. Обнаружено, что профиль средней скорости увеличивается на 6% и 24 % при -8Па и -16Па отрицательных значениях выходного давления по сравнению с нулевым выходным давлением.

- Показано, что при предложенной схеме вентиляции инфекционной палаты из трех пациентов обеспечивается нужный скоростной комфорт - скорость не превышает значения 0.2м/с.

Степень использования или рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы для вентиляции модели инфекционных палат с учетом теплообмена.

Область применения. Результаты исследования могут быть рекомендованы к внедрению в организации деятельности инфекционного отделения Карасуйской территориальной больницы с целью организации вентиляции инфекционной палаты 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 палаталарын желдетүү мисалында 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 теңдемелеринин 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 жылуулук алмашууну эске алуу менен инфекциялык бөлмөнүн моделин желдетүү үчүн колдонулушу мүмкүн.

Колдонуу чөйрөсү. Изилдөөнүн натыйжалары Кара-Суу аймактык ооруканасынын инфекциялык бөлмөсүн терс басым менен желдетүүнү уюштурууну ишке киргизүү үчүн сунушталышы мүмкүн.

SUMMARY

**dissertation work of Zeinura Kanybekovna Abdimalipova
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 a numerical study of the influence of the effect of forced convection in a hospital 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 ventilation of wards 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 $k-\omega$ 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 for ventilation of a model of infectious disease wards taking into account heat exchange.

Application area. The results of the study can be recommended for implementation in the organization of activities of the infectious diseases department of the Karasuu Territorial Hospital in order to organize ventilation of the infectious diseases ward with negative pressure.