

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им.И.РАЗЗАКОВА**

На правах рукописи
УДК: 51:51-71

Абдрасакова Айзада Байышбековна

**Математическое моделирование регионального климата для
отдельных областей Кыргызстана**

05.13.18 – математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических
наук, профессор
Сулайманова Света Мукашовна

Бишкек – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	11
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	17
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂), СРЕДНЕГОДОВЫХ СУММАРНЫХ ОСАДКОВ.	27
3.1. Прогнозирование временного ряда среднемесячной температуры воздуха с использованием нейронных сетей	27
3.2. Прогнозирование временного ряда эмиссий парниковых газов (CO ₂). 31	
3.3. Прогнозирование временного ряда осадков с использованием LSTM и XGBoost моделей нейронных сетей	34
3.4. Выводы по главе	37
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПК ANSYS	38
4.1. Математическое моделирование турбулентного потока дымовых выбросов.....	38
4.2. Численное моделирование диффузии загрязняющих веществ в атмосфере в ANSYS CFX	46
4.3. Влияние метеорологических параметров и препятствий на траекторию выбросов в ANSYS Fluent.....	55
4.4. Выводы по главе	75
ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ И ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ.....	76
5.1. Численное моделирование переноса пассивной примеси над ограниченной территорией	76
5.2. Моделирование процесса тепловлагодпереноса в неоднородной пористой среде с учетом разрыва пористости.....	88
5.3. Выводы по главе	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	105

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ1. ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЯ 2. АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ЭВМ	168

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

НС нейронные сети

ПГ – парниковые газы

ПМ - пористый материал

ЗСМ - зона сухого материала

ЗПН - зона полного намокания

ЗЧН - зоны частичного намокания

ГР - граница раздела

ЖС - связанная жидкость

ЖН – несвязанная жидкость

LSTM (Long Short-Term Memory) долгосрочная кратковременная память

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Современные изменения климата оказывают значительное влияние на различные регионы мира, включая Кыргызстан, который отличается сложным горным рельефом и разнообразием микроклиматических зон. Исследование климатических изменений в данном регионе имеет важное значение для прогнозирования возможных природных катастроф (засух, наводнений, изменения водных ресурсов, деградации ледников), а также для адаптации сельского хозяйства, гидроэнергетики и других стратегически важных отраслей экономики.

Кроме того, учитывая ограниченное количество метеостанций в горных районах Кыргызстана, математическое моделирование становится важным инструментом для восполнения пробелов в данных и повышения точности прогнозов. Наблюдаемые региональные климатические изменения имеют тенденцию к повышению среднегодовой температуры воздуха, при этом наибольший рост отмечается с середины 1970-х гг.

Таким образом, исследование по данной теме является актуальным как с научной точки зрения, поскольку способствует развитию методов регионального климатического моделирования, так и с практической, так как результаты могут использоваться государственными и международными организациями для разработки стратегий адаптации к изменению климата в Кыргызстане.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Диссертационная работа является инициативной.

Цель диссертационной работы - разработать и применить математические модели для анализа и прогнозирования климатических параметров (средней температуры воздуха, уровня CO₂ и осадков) в отдельных регионах Кыргызстана на основе современных методов машинного обучения и

численного моделирования.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ и прогнозирование среднемесячной температуры воздуха в отдельных регионах Кыргызстана на основе временных рядов с использованием методов машинного обучения;
2. Осуществить анализ динамики и прогнозирование выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу с учетом климатических и антропогенных факторов;
3. Разработать математические модели для описания процессов переноса загрязняющих веществ в атмосфере, включая уравнение Навье-Стокса для моделирования движения выбросов;
4. Выполнить численный расчет фильтрации потоков жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости для оценки гидродинамических процессов, влияющих на климатическую систему региона;
5. Провести анализ и прогнозирование среднемесячных сумм осадков за последние 100 лет по данным метеорологических наблюдений, используя модели временных рядов и методы машинного обучения;
6. Выполнить численное моделирование процессов диффузии загрязняющих веществ в атмосфере от точечного источника с использованием программного комплекса ANSYS CFX;
7. Осуществить расчет траекторий распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом турбулентных эффектов и наличия препятствий, в программном комплексе ANSYS Fluent.

Научная новизна работы состоит в разработке математической модели прогнозирования среднемесячной температуры воздуха, позволяющей оценивать изменения температуры с точностью до $1,6^\circ\text{C}$, основанной на нейросетевой архитектуре LSTM и проанализированной на данных за 100-летний период (1921–2021 гг.);

- выполнен прогноз динамики выбросов углекислого газа (CO_2) и общих трендов парниковых газов (ПГ) за 1990–2022 гг., проведена аппроксимация выбросов ПГ до 2050 г.;

- получена математическая модель турбулентного потока дыма при наличии препятствий на пути его распространения от точечного источника, разработанная с использованием программного комплекса ANSYS Fluent;

- впервые применено уравнение Навье-Стокса для моделирования турбулентного потока дыма с учетом влияния препятствий на траекторию его распространения от точечного источника выбросов;

- разработана модель диффузионного рассеивания дымовых выбросов в атмосферу с использованием программного комплекса ANSYS CFX, учитывающая динамические характеристики потока;

- впервые применено уравнение потока энергии для моделирования диффузионного рассеивания дымовых выбросов в атмосфере от точечного источника;

- получены количественные зависимости скорости и дальности распространения дымовых потоков от направления и скорости ветра, что позволяет более точно учитывать атмосферные условия при прогнозировании загрязнения воздуха;

- выполнены численные расчеты фильтрации распространения потока жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости, что позволяет учитывать гидродинамические процессы в неоднородных пластах, влияющие на климатическую систему;

- проведен анализ среднемесячных осадков за 1921–2021 гг., разработана модель прогнозирования среднемесячных сумм осадков до 2040 г. с учетом региональных климатических особенностей Кыргызстана.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные модели позволяют прогнозировать климатические параметры; разработанные математические модели распространения выбросов из дымовых труб;

применение уравнений Навье-Стокса и потока энергии для моделирования турбулентных и диффузионных процессов; использование программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX в 3D-моделировании; разработанные прогнозные модели изменения температуры воздуха и осадков могут быть применены в сельском хозяйстве, водных ресурсах и градостроительстве для адаптации к изменениям климата и эффективного управления природными ресурсами.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математическая модель прогнозирования среднемесячной температуры воздуха, основанная на анализе климатических данных за 100-летний период с использованием нейросетевой архитектуры LSTM;
2. Анализ и сравнительное исследование состава атмосферного воздуха в осенний и весенний периоды, выявляющие особенности сезонных колебаний концентрации загрязняющих веществ;
3. Прогнозная модель динамики выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу, включающая количественные оценки изменения уровня выбросов с учетом климатических и техногенных факторов, а также тренды выбросов парниковых газов до 2050 года;
4. Результаты численного моделирования процессов диффузии и рассеивания дымовых выбросов из точечного источника в атмосфере;
5. Модель турбулентного потока дымовых выбросов, учитывающая влияние препятствий (зданий и других объектов) на распространение загрязняющих веществ, построенная в программном комплексе **ANSYS Fluent**;
6. Модель прогнозирования суммарных атмосферных осадков, основанная на метеорологических данных за 1921–2021 гг., содержащая количественные зависимости для оценки их динамики до 2040 года в отдельных регионах Кыргызстана;
7. Расчеты процессов тепловлагопереноса в грунт, учитывающие взаимодействие почвы с атмосферными осадками и температурными

изменениями.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельной постановке научной задачи, проведении комплекса теоретических и экспериментальных исследований, получении научных результатов, их всестороннем анализе и формулировке обоснованных выводов, имеющих научную и практическую значимость; в разработке математических моделей прогнозирования климатических параметров, с использованием методов машинного обучения и численного моделирования; в построении и реализации моделей диффузии и турбулентного переноса загрязняющих веществ в атмосфере с учетом препятствий; в проведении численных расчетов процессов тепловлагопереноса.

Постановка задач исследования, обсуждение и внедрение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем, профессором С.М.Сулаймановой.

В работах [3-7] Сулаймановой С.М. принадлежит анализ и прогнозирование климатических данных с помощью нейронных сетей. В работах [1, 2] Картаковой А.Дж. принадлежит моделирование двухфазного течения смеси газа, твердых частиц и численное моделирование переноса примесей над ограниченной территорией.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты данной работы рассмотрены: на Международной научно – практической конференции “20-летие ИНИТ КГУСТА им.Н.Исанова” Бишкек, 19-21 октября 2021 г., на Международной конференции “Интеграция науки и образования в современном мире» Нурсултан (Астана), Казахстан. 15 октября 2021 г., на Международной конференции «30-летие КГУСТА им.Н.Исанова” Бишкек, 28-30 мая 2022 г., на Международной научно-практической конференции «Роль науки и инновационных технологий в устойчивом развитии горных территорий и экосистем», КГТУ им. И. Раззакова (Кыргызстан, Бишкек, 27-28 октября 2022г.), на Международной научной конференции “Современная техника и технологии в научных исследованиях”, на Международной научно-практической

конференции «Цифровая трансформация общества и искусственный интеллект» Кыргызско-Германского института прикладной информатики, 23 ноября 2023 г.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По содержанию настоящей диссертации опубликовано в 10 научных работах, из них 6 в журналах, рекомендованных НАК ПКР; 1 в материалах международной научной конференции; 3 авторских свидетельствах Кыргызпатента на созданные программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения, списка использованной литературы из 102. Основное содержание диссертации изложено на 170 страницах.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору С.М.Сулаймановой за постановки задач, идею в исследовании метода, за советы и обсуждения на этапах формирования данной диссертации, а также за постоянное внимание к работе.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В условиях глобального потепления особую значимость приобретает разработка точных и надежных математических моделей, позволяющих анализировать и прогнозировать климатические процессы на региональном уровне. Такие модели необходимы для:

- Оценки динамики температуры, осадков, влажности и других метеорологических параметров в отдельных районах Кыргызстана.
- Разработки сценариев изменения климата и их последствий для экономики, экологии и социального развития.
- Поддержки принятия решений в сфере водных ресурсов, сельского хозяйства, градостроительства и энергоснабжения.

Значительный вклад в анализ и прогнозирование регионального климата Кыргызстана внес А.О. Подрезов в 2021 году, который в своих трудах он провел обзор исследований климата Кыргызстана, его изменений и прогнозов. Эти работы существенно расширяют понимание климатических изменений и их влияния на природные ресурсы Кыргызстана. Наблюдаются многочисленные последствия климатических изменений, которые в настоящее время оказывают серьезное воздействие на окружающую среду, здоровье населения и различные сферы экономической деятельности человека [38].

Следует отметить, что проблемами метеорологии и атмосферы предложены в работах Л.Т.Матвеева [58]. Численные методы, используемые в атмосферных моделях применены в исследованиях Ф.Мезингера, А.Аракава [61], В.П.Дымникова [34]. Оптимальное прогнозирование природных процессов предложено В.В.Пененко [71]. Также климатические изменения рассмотрены в исследованиях Ш.Ильясова, О.Забенко, Н.Гайдамак [39].

Основным средством прогнозирования климата и оценки прошлых и будущих изменений климата является температура воздуха. Многие исследования показывают, что в условиях глобального потепления ведут по-

разному ведут себя температуры, усредненные по отдельным регионам. Изменения регионального климата происходят часто гораздо быстрее на фоне глобальных изменений. В совместных исследованиях С.М.Сулаймановой [1,4,6] проведены сравнительные анализы и составлен прогноз среднемесячной температуры воздуха в отдельных регионах Кыргызстана (Чуйского, Иссык-Кульского, Ошского регионов) [43,88,93] на основе временных рядов за 100-летний период (1921-2021 гг.) с нейросетевой моделью LSTM [14,16]. Динамика имеет не линейный тренд и показала, что температура значительно возросла. Также в совместных работах С.М.Сулаймановой [3,4] проведены анализы температуры воздуха весенних и осенних месяцев вышеперечисленных регионов Кыргызстана за 100-летний период. Проведены расчеты: средних отклонений и среднее значения температуры воздуха. Прогнозы совпали с моделями LSTM.

В области математического моделирования и прогнозирования нейросетевыми методами значительный интерес вызывает статья Бильгаевой Л.П. и Власова К.Г., где рассматриваются модели нейросетевого прогнозирования в среде MATLAB. В статье [4] анализируются возможности применения нейронных сетей для решения задач экономического и технического характера, что подтверждает универсальность и эффективность нейросетевых методов. Особое значение имеет учебное пособие Борзенкова А.В. по дифференциальным уравнениям в MATLAB, где изложены методы численного решения уравнений и их практическое применение. Этот источник служит хорошей базой для освоения математических методов моделирования в среде MATLAB, что актуально при разработке различных моделей климатических и экологических процессов.

Также важным является практическое руководство В.В. Сидорика по моделированию в среде MATLAB, которое содержит методы решения задач моделирования и анализа сложных систем, что способствует развитию навыков численных расчетов и моделирования физических процессов

Наряду с факторами в изменении климата также выступают высокие значения увеличение углекислого газа (CO_2). Глобальное потепление во многих исследованиях по изменению климата связывается с ростом малой концентрации углекислого газа k_{CO_2} в атмосфере ($k_{\text{CO}_2}=5 \times 10^{-4}$). При решении задачи прогнозирования временных рядов, членами которых являются эмиссии и парниковые газы в эквиваленте CO_2 тысячи тонн в год начиная с 1990 по 2018 гг..

Загрязнение атмосферного воздуха обусловлено выбросами из точечных источников и других источников. Все существенные доказательства того, что загрязнение воздуха влияет на здоровье людей и животных, наносит ущерб растительности, почве и материалам, влияет на климат, снижает видимость и солнечную радиацию, создает угрозу безопасности и в целом мешает наслаждаться жизнью и имуществом [1].

Около 60% выбросов приходится на точечные источники. К основным загрязнителям воздуха обычно относят пыль, твердые частицы, PM_{10} (твердые частицы диаметром 10 микрон и менее) и $\text{PM}_{2,5}$ из-за неполного сгорания топлива или побочных продуктов процесса, оксиды азота (в основном из-за сочетания атмосферного кислорода и азота при высоких температурах), двуокись серы (в основном из-за сжигания топлива, содержащего большое количество серы), окись углерода (из-за не полностью сгоревшего топлива), озон и свинец.

Математические модели диффузии наиболее полезны в настоящее время, поскольку они предоставляют полезную информацию для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ и быстро обеспечивают выходные данные. Математические модели качества воздуха представляют собой уникальные инструменты [2]:

- принятие мер по контролю за выбросами; то есть определение максимально допустимых уровней выбросов, которые будут соответствовать установленным стандартам качества воздуха;
- оценка предлагаемых методов и стратегий ограничения выбросов; то есть оценка воздействия будущих средств контроля;

Аналитические решения уравнения трехмерной диффузии для приподнятого сплошного точечного источника с переменным ветром и вихревой диффузией получены только при ограниченных предположениях. Ф.В.Смит в работе [100] использовал степенные вариации для ветра и диффузии и предположил, что вариация бокового ветра всегда имеет гауссову форму. Использовал степенной закон для коэффициентов диффузии по y и z , но считал ветер постоянным.

В работе А.А.Манукян., Т.В.Селиверстова исследовалась траектория распространения загрязнений от точечного источника в зависимости от характера ландшафта [55]. В совместных работах С.М.Сулаймановой [5] было исследовано численное моделирование процессов диффузии загрязняющих веществ в атмосфере от точечного источника с помощью программного комплекса ANSYS CFX [58]. Также был осуществлен расчет траекторий распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом турбулентных эффектов и наличия препятствий. Использовались методы вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent [92].

В совместной работе С.М.Сулаймановой и др. [2] используется математическая модель гидротермодинамики атмосферных процессов на ограниченной территории регионального масштаба. Для записи уравнений используя декартову систему координат x, y, z (ось x ориентирована на восток, y – на юг, z – вертикаль вниз). Атмосферные процессы: уравнения движения, уравнения неразрывности, уравнение переноса тепла и примеси, уравнение состояния (Клайперона). Всего было проведено три численных эксперимента по моделированию процесса распространения примеси над территорией Кыргызской Республики с различными метеорологическими условиями [24]. Интегрирование уравнения диффузии примеси во всех экспериментах проводилось на 30 и более суток модельного времени с шагом 1 сутки. Использовался реальный рельеф поверхности, изолинии. Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют реалистичность

моделирования процесса распространения примеси.

Особое внимание уделяется моделированию переноса пассивных примесей, что важно для экологической оценки и защиты окружающей среды. В статье "Численное моделирование переноса пассивной примеси над ограниченной территорией" подробно описываются численные методы и подходы к моделированию подобных процессов [2]. В работах по гидромеханике и теплообмену представлены фундаментальные теоретические основы численных методов. Так, в книге Андерсона Д.Дж. "Вычислительная гидромеханика и теплообмен" изложены основные подходы к моделированию гидродинамических процессов и теплообмена, что важно для понимания механизмов распространения загрязнений и тепловых потоков.

Течение жидкостей через пористые материалы подчеркивает Р.Коллинз в работе в 1964 году [43]. Основные уравнения модели включают уравнение неразрывности, уравнения движения с учетом фильтрационных сил и уравнение фильтрации жидкости для описания течения жидкости через пористую среду. В модели учитываются зоны полного и частичного намокания, движение фронта намокания и особенности взаимодействия жидкости с капиллярными структурами.

Работы Будаговского А.И. и соавторов посвящены вопросам тепло- и влагообмена в растительном покрове, а также количественной теории фотосинтеза. В исследованиях рассматриваются распределение потоков радиации, что важно для понимания энергетического баланса в биологических системах и моделирования фотосинтетической активности (1976, 1964, 1966, 1968). Эти модели применимы для оценки влияния климатических факторов на растительность и позволяют прогнозировать изменения в экосистемах.

Н.Н. Веригин в своих работах, опубликованных в 1953 году в Докладах Академии наук СССР, исследует вопросы движения влаги в почве и процессов смачивания почвы при орошении дождеванием. В статье «Движение влаги в почве» (1953) рассматриваются механизмы переноса влаги, водопоглощение и

фильтрация, что является важными аспектами для оптимизации ирригационных систем и повышения эффективности водопользования. В другой статье «Смачивание почвы при орошении посредством дождевания» исследуются особенности процесса увлажнения почвы при различных режимах орошения, что важно для поддержания устойчивого сельского хозяйства. Данные источники подчеркивают значимость моделирования процессов фильтрации и увлажнения в почве, что актуально для разработки эффективных систем орошения и оценки их воздействия на окружающую среду. В целом, исследования Веригина дополняют теоретическую базу, предоставляя практические знания о поведении влаги в почвенных слоях, что важно для инженерных и экологических приложений.

В диссертационной работе исследуются климатические параметры отдельных регионов Кыргызской Республики, включая температуру воздуха, осадки и выбросы углекислого газа (CO_2).

Для разработки математических моделей в прогнозировании климатических параметров в работе используются методы прогнозирования и представлена разработанная модель временных рядов на основе нейросетевых архитектур LSTM, XGBoost. Представлены методы использования программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX для моделирования трехмерных, нестационарных и стационарных задач переноса и диффузии. Приводится система уравнений, привлекаемая для исследования нестационарных процессов тепловлагоденоса в пористой среде.

Выводы по главе

В первой главе представлен общий обзор исследований, относящихся к теме диссертации. Здесь собраны результаты работ различных авторов, а также данные о воздействии изменения климата и аналогичные проблемы, которые рассматриваются в данной диссертации. Описаны методы, применяемые автором для численного решения и моделирования задачи.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предмет исследования – математические модели прогнозирования климатических параметров и численные методы анализа атмосферных и гидрологических процессов

Объект исследования – климатические параметры отдельных регионов Кыргызской Республики, включая температуру воздуха, осадки и выбросы углекислого газа (CO_2).

Методы исследования – в работе использованы методы машинного обучения (нейросети LSTM, XGBoost, GRNN), численного моделирования атмосферных процессов (уравнения Навье-Стокса, модели турбулентности), а также вычислительная гидродинамика (CFD) в программных комплексах ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

Прогнозирование в науке о данных— это метод, используемый для предсказания будущих числовых значений на основе данных наблюдения, собранных с течением времени, через регулярные или нерегулярные интервалы.

Долгая краткосрочная память (Long short-term memory; LSTM) – особая разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей, способная к обучению долговременным зависимостям. Они были представлены Зеппом Хохрайтер и Юргеном Шмидхубером (Jürgen Schmidhuber) в 1997 году, а затем усовершенствованы и популярно изложены в работах многих других исследователей. Они прекрасно решают целый ряд разнообразных задач и в настоящее время широко используются.

LSTM разработаны специально, чтобы избежать проблемы долговременной зависимости. Запоминание информации на долгие периоды времени – это их обычное поведение, а не что-то, чему они с трудом пытаются обучиться.

Чтобы спрогнозировать значения будущих временных шагов последовательности, можно обучить сеть LSTM регрессии от

последовательности к последовательности, где ответами являются обучающие последовательности со значениями, сдвинутыми на один временной шаг. То есть на каждом временном шаге входной последовательности сеть LSTM учится предсказывать значение следующего временного шага. При прогнозировании значения нескольких временных шагов в будущем, используем функцию *predictAndUpdateState* для прогнозирования временных шагов по одному и обновления состояния сети при каждом прогнозе.

В представленном случае используется набор данных среднемесячная температура воздуха *avgtemp_dataset*. В этом примере сеть LSTM обучается прогнозировать количество случаев среднемесячной температуры воздуха с учетом количества случаев в предыдущие месяцы.

Данные загружаются в *avgtemp_dataset*, где один временной ряд с временными шагами, соответствующими месяцам, и значениями, соответствующими количеству температуры. Выход представляет собой массив ячеек, где каждый элемент представляет собой один временной шаг. Изменяются данные, чтобы они были вектором-строкой.

```
data = avgtemp_dataset;
data = [data{:}];
figure
plot(data)
xlabel("years")
ylabel("Temperature")
title("Ежемесячные средние температуры в г.Ош с 1921-2021")
```

Чтобы спрогнозировать значения будущих временных шагов последовательности, нужно задать ответы как обучающие последовательности со значениями, сдвинутыми на один временной шаг. То есть на каждом временном шаге входной последовательности сеть LSTM учится предсказывать значение следующего временного шага. Предикторы — это обучающие последовательности без конечного временного шага.

Указание вариантов обучения. Устанавливается решатель на «Адам» и тренируется в течение 250 эпох. Чтобы предотвратить взрыв градиентов, устанавливается порог градиента на 1. Указывается начальная скорость обучения 0,005 и уменьшается скорость обучения после 125 эпох, умножив на коэффициент 0,2.

```
options = trainingOptions('Adam', ...  
    'MaxEpochs',250, ...  
    'GradientThreshold',1, ...  
    'InitialLearnRate',0.005, ...  
    'LearnRateSchedule','piecewise', ...  
    'LearnRateDropPeriod',125, ...  
    'LearnRateDropFactor',0.2, ...  
    'Verbose',0, ...  
    'Plots','training-progress');
```

Стандартизировать тестовые данные, используя те же параметры, что и обучающие данные.

```
dataTestStandardized = (dataTest - mu) / sig;  
XTest = dataTestStandardized(1:end-1);
```

Используется альтернативные методы прогнозирования, такие как. XGBoost (Градиентный бустинг) — это алгоритм с открытым исходным кодом, который реализует деревья градиентного усиления с дополнительными улучшениями для лучшей производительности и скорости, т.е. это метод машинного обучения, используемый в задачах регрессии и классификации. Он создает модель прогнозирования как ансамбль других, слабых моделей прогнозирования, которые обычно являются деревьями решений. По сути, бустинг работает путем добавления новых моделей для исправления ошибок, которые сделали предыдущие.

XGBoost — это тип модели градиентного усиления, которая использует методы построения дерева для прогнозирования своего конечного значения. Обычно для достижения пиковой производительности требуется дополнительная настройка.

В отличие от обычных данных методы машинного обучения, где каждое наблюдение не зависит от другого, данные для прогнозов временных рядов должны быть в последовательном порядке и связаны с каждой точкой данных. Например, данные временных рядов могут включать ежемесячные осадки, ежедневные средние температуры воздуха, ежедневные продажи и т. д.

Модели градиентного бустинга приобрели популярность в сообществе машинного обучения благодаря своей способности достигать превосходных результатов в широком диапазоне вариантов использования, включая как регрессию, так и классификацию. Хотя эти модели традиционно были менее распространены в прогнозировании, они могут быть весьма эффективными в этой области. Некоторые из основных преимуществ использования моделей градиентного бустинга для прогнозирования включают:

Легкость, с которой в модель можно включать экзогенные переменные в дополнение к авторегрессионным переменным. Способность фиксировать нелинейные зависимости между переменными. Высокая масштабируемость, позволяющая моделям обрабатывать большие объемы данных. Некоторые реализации позволяют включать категориальные переменные без необходимости дополнительного кодирования, например, прямого кодирования. Несмотря на эти преимущества, использование моделей машинного обучения для прогнозирования может быть сопряжено с рядом проблем, из-за которых аналитики могут не захотеть их использовать. Основными из них являются: Преобразование данных таким образом, чтобы их можно было использовать в качестве задачи регрессии. В зависимости от того, сколько будущих прогнозов необходимо (горизонт прогнозирования), может потребоваться итеративный процесс, в котором каждый новый прогноз основывается на предыдущих. Для

проверки модели требуются определенные стратегии, такие как бэктестинг, форвардная проверка или перекрестная проверка временных рядов. Традиционная перекрестная проверка не может быть использована.

Библиотека `skforecast` предоставляет автоматизированные решения для этих задач, упрощая применение и проверку моделей машинного обучения для задач прогнозирования. Библиотека поддерживает несколько расширенных моделей градиентного бустинга, включая `XGBoost`.

Для облегчения обучения моделей, поиска оптимальных гиперпараметров и оценки их прогностической точности данные делятся на три отдельных набора: Создает признаки (месяц, год, осадки за предыдущий месяц).

1. Разделяет данные на `train/test`.
2. Обучает `XGBoostRegressor`.
3. Строит прогноз и визуализирует результаты.

Скользящая статистика и скользящие средние. Скользящая статистика и скользящие средние — это статистические методы, используемые для обобщения информации за определенный период времени. Одним из таких методов является 7-дневное скользящее среднее.

Прежде чем приступить к прогнозированию с использованием `XGBoost`, необходимо сначала установить пакет.

```
pip install xgboost
```

После установки мы подготовим данные для обучения нашей модели. Теоретически, прогнозирование `XGBoost` будет реализовывать модель регрессии на основе единичных или множественных признаков для прогнозирования будущих числовых значений. Вот почему обучение данных также должно быть в числовых значениях. Кроме того, чтобы включить движение времени в нашу модель `XGBoost`, мы преобразуем данные о времени в множественные числовые признаки.

Начнем с создания функции для создания числовых характеристик на основе даты.

Прогнозы временных рядов часто включают трендовые, сезонные и другие закономерности из данных для создания прогноза. Один из простых способов рассмотреть закономерность — визуализировать ее.

Покажем, как работает модель XGBoost в Python.

Шаг 1: Импорт необходимых библиотек Python

Сначала необходимо импортировать все библиотеки, которые понадобятся для модели:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import xgboost as xgb
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.model_selection import train_test_split
import matplotlib.pyplot as plt
```

Как видно, импортируется пакет `pandas`, который отлично подходит для анализа и обработки данных. Кроме того, есть также `NumPy`, который будет использоваться для выполнения различных математических операций с массивами, также метод `train_test_split` — он чрезвычайно важен, так как позволяет разбить данные на обучающие и тестовые подмножества. Наконец, здесь есть метод `xgb.XGBRegressor`, который отвечает за обеспечение функциональности алгоритма XGBoost. Он импортируется целиком в начале нашей модели.

Шаг 2: Определение пути к набору данных

Используя функцию `Path`, мы можем определить, где на нашем ПК хранится набор данных.

Далее прочитается данный файл набора данных с помощью функции `pd.read_excel`. Мы вставим путь к файлу в качестве входных данных для метода. После используется метод `reduce_mem_usage`, который уже определен по порядку. Это можно сделать, передав ему значение данных из функции чтения:

```
# Загрузка данных
```

```
df = pd.read_excel("Осадки_Бишкек.xlsx")
df.rename(columns={"Год-Месяц": "Дата", "Осадки": "Осадки"},
inplace=True)
df["Дата"] = pd.to_datetime(df["Дата"], format="%Y-%m")
df.set_index("Дата", inplace=True)
```

Шаг 3: Очистка и разделение набора данных. Чтобы очистить и разделить набор данных, который используется, применяется следующий код:

```
# Создание признаков временного ряда
df["Месяц"] = df.index.month
df["Год"] = df.index.year
df["Осадки_пред"] = df["Осадки"].shift(1) # Осадки за прошлый месяц

df.dropna(inplace=True)
```

```
# Разделение на train/test
train_size = int(len(df) * 0.8)
train_data = df.iloc[:train_size]
test_data = df.iloc[train_size:]
```

```
# Выделение признаков и целевой переменной
X_train = train_data[["Месяц", "Год", "Осадки_пред"]]
y_train = train_data["Осадки"]
X_test = test_data[["Месяц", "Год", "Осадки_пред"]]
y_test = test_data["Осадки"]
```

Шаг 4: Использование алгоритма XGBoost. Нужно использовать конструктор XGBRegressor() для создания экземпляра объекта. Он может принимать несколько параметров в качестве входных данных – каждый из них приведет к небольшому изменению того, как работает алгоритм XGBoost.

```
# Обучение XGBoost-модели
model = xgb.XGBRegressor(objective="reg:squarederror",
n_estimators=100, learning_rate=0.1, max_depth=5)
model.fit(X_train, y_train)

# Прогнозирование
y_pred = model.predict(X_test)
```

Шаг 5: Построим график характеристик LGBM в зависимости от значимости XGBoost, теперь мы можем построить график важности каждой функции данных в Python с помощью следующего кода:

```
# Визуализация предсказаний
plt.figure(figsize=(12, 5))
plt.plot(df.index[-len(y_test):], y_test, label='Фактические осадки')
plt.plot(df.index[-len(y_test):], y_pred, label='Прогноз XGBoost')
plt.xlabel("Год")
plt.ylabel("Осадки (мм)")
plt.title("Прогноз осадков XGBoost")
plt.legend()
plt.show()
```

Нейронные сети GRNN (Generalized Regression Neural Network) предназначены для решения задач обобщенной регрессии, анализа временных рядов и аппроксимации функций. Отличительной чертой предложенных сетей является очень высокая скорость их обучения.

Архитектура сети GRNN аналогична архитектуре радиальной базисной сети, но особенностью является структура второго слоя, в котором используется блок `normprod` для вычисления нормированного скалярного произведения строки массива весов `LW21` и вектора входа `a1` в соответствии со следующим соотношением:

Первый слой – это радиальный базисный слой с числом нейронов, равным числу элементов Q обучающего множества. В качестве начального приближения для матрицы весов выбирается массив $P1$; смещение $b1$ устанавливается равным вектор-столбцу с элементами $0,7/SPREAD$. Функция `dist` вычисляет расстояние между вектором входа и вектором веса нейрона; вход функции активации $n1$ равен поэлементному произведению взвешенного входа сети на вектор смещения; выход каждого нейрона первого слоя $a1$ является результатом преобразования вектора $n1$ радиальной базисной функцией `radbas`.

Второй слой – это линейный слой с числом нейронов, также равным R , причем в качестве начального приближения для матрицы весов $LW \{2,1\}$ выбирается

массив T. Результаты исследования. В данной задаче 100 точек (среднемесячная температура воздуха за 100 летний период для регионов Кыргызстана за март и ноябрь месяцы) данных массив T, которые будут результатами. Входы массивы X должны приводить к целевым выходам T.

$$X = [6,2 \ 7,1 \ 1,7 \ 0,5 \ 6 \ 5 \ 3,6 \ \dots 5,6];$$
$$T = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ \dots 100];$$

Применяется NEWGRNN для создания обобщенной регрессионной сети y. Используется у SPREAD чуть меньше 1, расстояния между входными значениями, чтобы получить функцию y, которая достаточно точно соответствует отдельным точкам данных

$$\text{spread} = 0.7; \text{net} = \text{newgrnn}(X,T,\text{spread});$$
$$A = \text{net}(X);$$

Используется сеть для аппроксимации функции при новом входном значении y.

$$x = 3.5; y = \text{net}(x);$$

Реакция сети моделируется для многих значений, что представляет функцию в следующем виде:

$$X2 = 0:.7,1:100; Y2 = \text{net}(X2).$$

Каждый шаблон имеет ядро в виде определенного решателя (Fluent, CFX, Static Structural и т. д.), а также включает вспомогательные модули для подготовки геометрической модели (Design Modeler), конечно-элементной или конечно-объемной модели (Meshing), задания свойств материалов (Engineering Data) и постобработки результатов расчета (Results).

Fluid Flow (CFX) предназначен для решения задач гидродинамики, а также задач сопряженного теплообмена. Позволяет моделировать широкий спектр физических процессов в жидкостях и газах, таких как нестационарность, турбулентность, многокомпонентность и многофазность среды, химические реакции, радиационное излучение, акустические волны и т. д. Хорошо зарекомендовал себя в задачах турбомашиностроения, где необходимо моделирование течений жидкостей и газов в условиях вращающихся

механизмов.

Fluid Flow (Fluent) имеет аналогичный модулю CFX функционал, однако содержит более широкий спектр моделей и методов для моделирования течений с химическими реакциями. Также обладает встроенным редактором расчетных сеток

2.1. Выводы по главе

Описаны используемые методы прогнозирования и представлена разработанная модель временных рядов на основе нейросетевых архитектур LSTM, XGBoost, GRNN. Представлены методы использования программных комплексов ANSYS Fluent и ANSYS CFX для моделирования трехмерных, нестационарных и стационарных задач переноса и диффузии.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂), СРЕДНЕГОДОВЫХ СУММАРНЫХ ОСАДКОВ.

3.1. Прогнозирование временного ряда среднемесячной температуры воздуха с использованием нейронных сетей

Рассматриваются тенденции изменений временных рядов среднемесячного температурного воздуха Ошской области за 100-летний период 1921-2021гг с помощью LSTM модели нейронных сетей для решения задачи прогнозирования.

Региональные климатические изменения во многом определяются не только глобальными процессами, но известными физико-географическими условиями конкретного региона, что в полной мере можно отнести к некоторым областям Кыргызстана.

Оценка трендов только среднемесячной температуры воздуха данного региона не позволяют выявить структуру температурных изменений. В данной работе применяется прогнозирование временных рядов для данных среднемесячных температур воздуха, что дает возможность исследовать изменения регионального климата.

Задача прогнозирования временных рядов заключается в том, чтобы продолжить значения данных среднемесячной температуры воздуха прошлых периодов в будущее, где эти значения еще не известны.

Рекуррентная сеть с долгосрочной и краткосрочной памятью LSTM (Long Short Term Memory) глубокого обучения более точно определяет закономерности в данных временных рядов, и эффективно может применяться для прогнозирования будущего тренда данных [1].

Данные представляются как среднемесячная температура воздуха Ошской

области в промежутке с 1921-2021гг.на рисунке 3.1. Они разбиваются на обучающий и тестовый набор, где данные до 2021г. используются в качестве обучающих данных для модели, а затем пытаемся предсказать среднемесячную температуру в течение последней части набора данных [29].

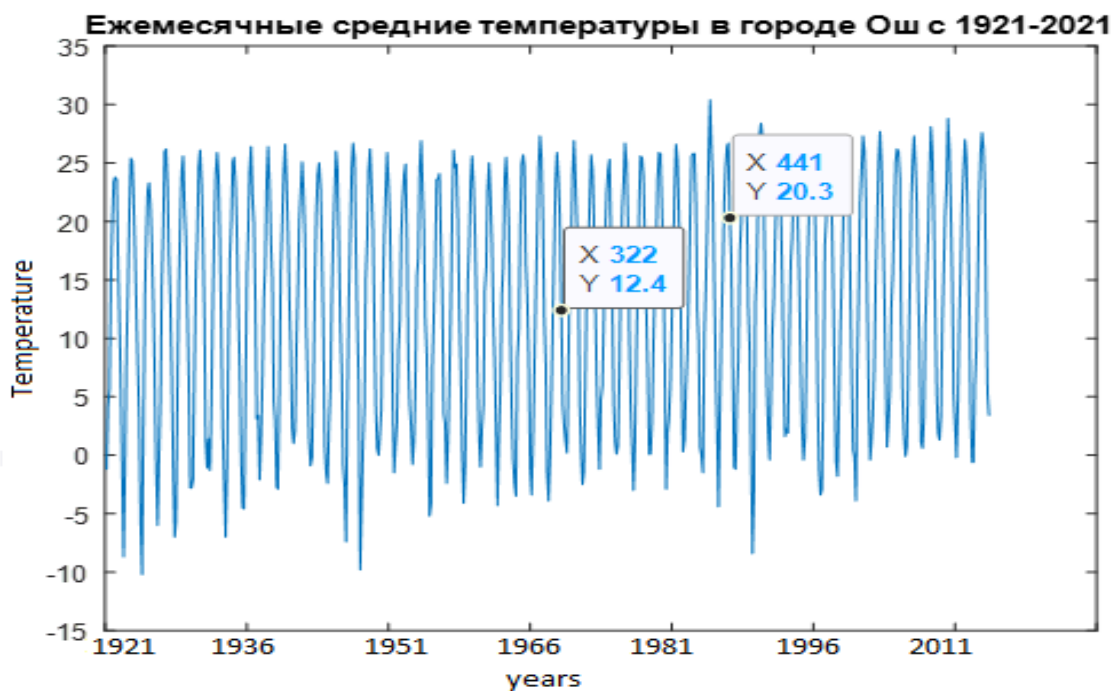


Рисунок 3.1 - Временные ряды среднемесячных температур воздуха (C°) по Ошскому региону Кыргызской Республики за 1921-2021 гг.

Обучение сети LSTM. Для обучения нейронной сети была построена модель рекуррентной нейронной сети LSTM со следующими параметрами обучения длина последовательности, равная 500; количество единиц скрытого слоя, равное 200; количество элементов вывода, равное 1. указанными параметрами обучения с помощью trainNetwork показан на рисунке.3.2.

net = trainNetwork (XTrain, YTrain, слоу, параметры);

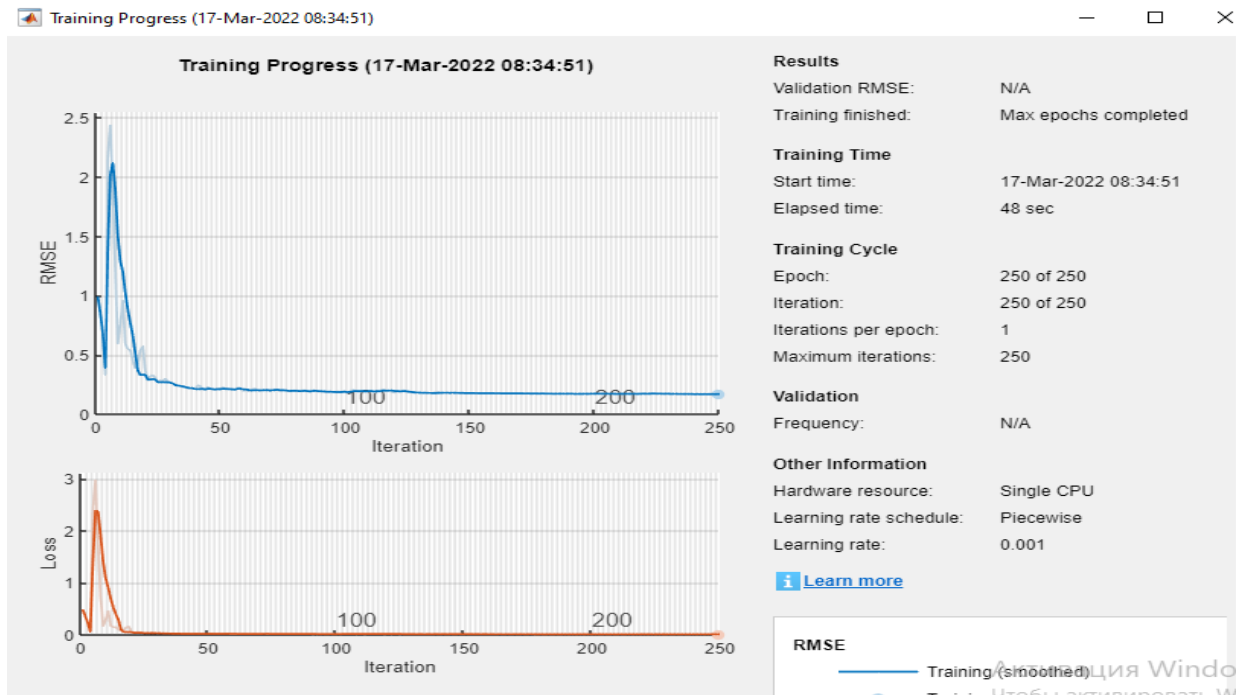


Рисунок 3.2 - Обучение LSTM с указанными параметрами обучения с помощью trainNetwork

Чтобы спрогнозировать значения нескольких временных шагов в будущем, используются функция *predictAndUpdateState* для прогнозирования временных шагов по одному и обновления состояния сети при каждом прогнозе. Для каждого прогноза используется предыдущий прогноз в качестве входных данных для функции.

Стандартизировать тестовые данные, используя те же параметры, что и обучающие данные.

$$dataTestStandardized = (dataTest - mu) / sig;$$

$$XTest = dataTestStandardized(1:end-1);$$

Чтобы инициализировать состояние сети, сначала предсказывается обучающие данные XTrain. Затем выводится первый прогноз на рисунке 3.3., используя последний временной шаг обучающего ответа YTrain(end). Переберем оставшиеся прогнозы и вводим предыдущий прогноз в *predictAndUpdateState*.

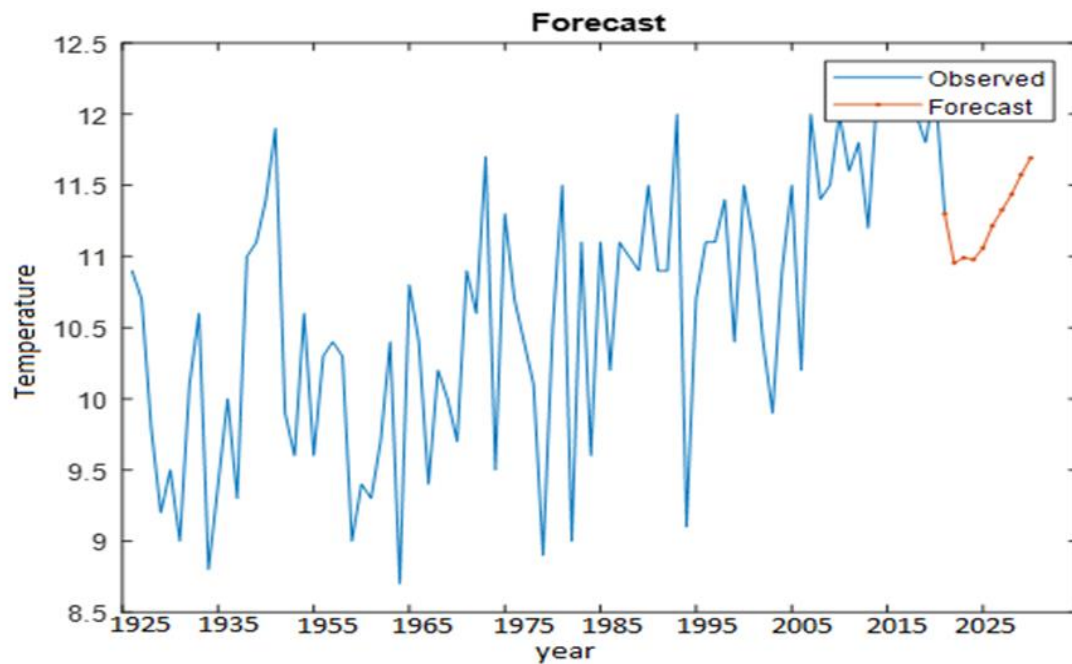


Рисунок 3.3 - Временной ряд обучения с прогнозируемыми значениями

Делаются прогнозы на каждом временном шаге на рисунке 3.4. Для каждого прогноза предсказываем следующий временной шаг, используя наблюдаемое значение предыдущего временного шага. Устанавливается для параметра «Среда выполнения» в *PredictAndUpdateState*

```
YPred = [];
numTimeStepsTest = numel(XTest);
for i = 1:numTimeStepsTest
    [net, YPred(:,i)] =
predictAndUpdateState(net, XTest(:,i), 'ExecutionEnvironment', 'cpu');
end
```

Нестандартизируем прогнозы, используя параметры, рассчитанные ранее.

```
YPred = sig*YPred + mu;
Calculate the root-mean-square error (RMSE).
rmse = sqrt(mean((YPred-YTest).^2))
rmse = 158.0959
```

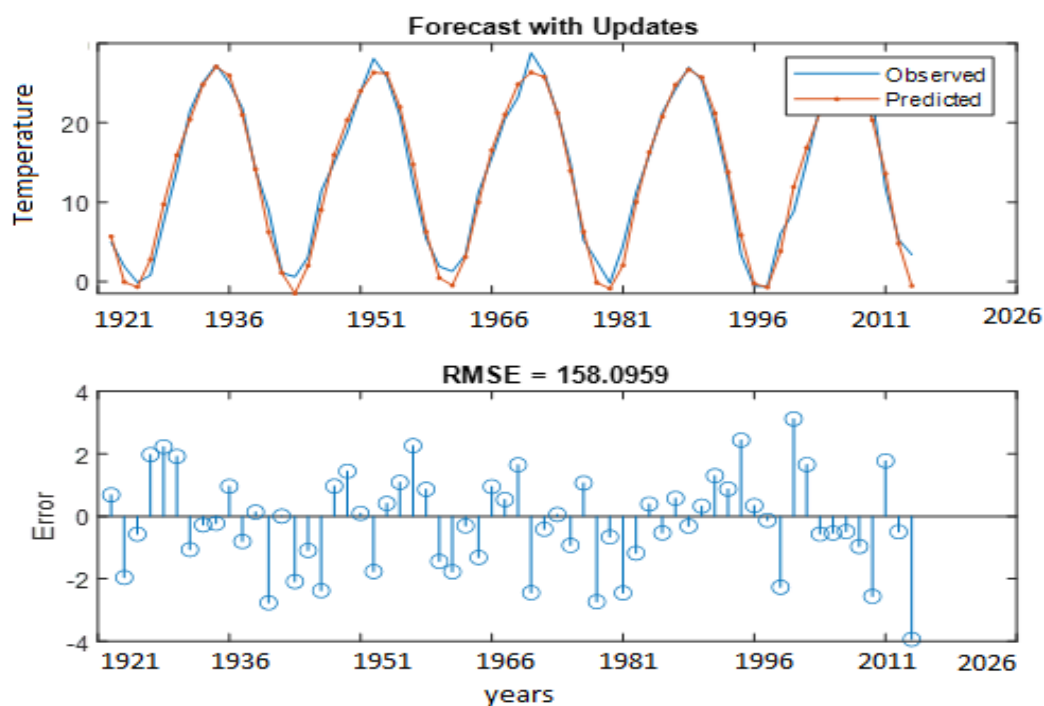


Рисунок 3.4 - Прогнозируемые значения с тестовыми данными

Изучение климатических изменений Ошской области Кыргызской Республики продемонстрировало, что среднемесячная температура воздуха за период 1921-2021 гг. существенно возросла, при всем этом тенденция имеет нелинейный характер и в прошедшие десятки лет также значительно возросла.

Анализ представленных данных и итогов, полученных при помощи модели LSTM нейросетевого прогнозирования владеют весьма большой обобщающей способностью которые с большей точностью позволяют аппроксимировать и предсказывать значения временного ряда.

3.2. Прогнозирование временного ряда эмиссий парниковых газов (CO_2)

Глобальное потепление во многих исследованиях по изменению климата связывается с ростом малой концентрации углекислого газа k_{CO_2} в атмосфере ($k_{\text{CO}_2}=5 \times 10^{-4}$). При решении задачи прогнозирования временных рядов, членами которых являются эмиссии и парниковые газы в эквиваленте CO_2 тысячи тонн в год начиная с 1990 по 2018 гг., в качестве нейронной сети была выбрана

обобщенно-регрессионная сеть, реализующая методы ядерной аппроксимации (GRNN). Недавние исследование в области прогнозирования с помощью GRNN предполагают, что GRNN может быть многообещающей альтернативной традиционной модели временных рядов [5-7]. Он показал большие возможности в моделировании и прогнозировании нелинейных временных рядов и постепенно входит в ряды многоцелевых, широко используемых методов.

GRNN-сеть имеет два скрытых слоя: слой радиальных элементов и слой элементов, которые формируют взвешенную сумму для соответствующего элемента выходного слоя. В выходном слое определяется взвешенное среднее путем деления взвешенной суммы на сумму весов. В качестве радиальной функции применяется функция Гаусса. Используем NEWGRNN для создания обобщенной регрессионной сети.

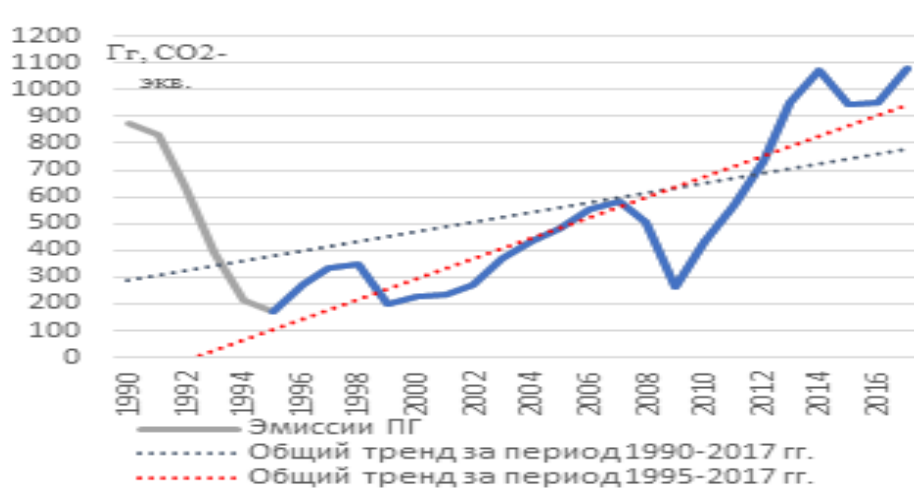


Рисунок 3.5 - Динамика выбросов за 1990-2017 гг.

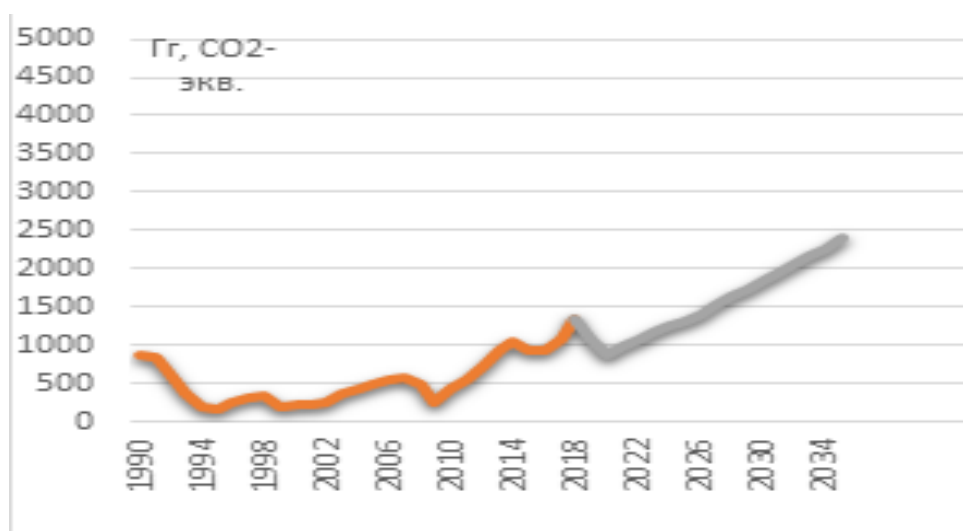


Рисунок 3.6 - Прогнозируемые значения будущих эмиссий парниковых газов на период 2022-2035 гг.

На рисунках 3.5, 3.6 представлены графики исходных тестовых и прогнозных значений временного ряда (непрерывной красной линией представлено прогнозируемое нейросетевой моделью значение, синими точками тестовое— значение).

3.3. Прогнозирование временного ряда осадков с использованием LSTM и XGBoost моделей нейронных сетей

Прогнозирование временного ряда осадков в г. Бишкек за 100 лет с помощью LSTM модели нейронной сети. Данные содержат два столбца: "Год-Месяц" — дата в формате "ГГГГ-ММ"; "Осадки" — количество осадков (предположительно в мм). Приведем данные в удобный формат для анализа, преобразуем даты в формат datetime и проверим их на пропущенные значения.

Важной частью при моделировании является разделение данных для обучения и тестирования, который гарантирует, что созданная модель может обобщаться за пределами обучающих данных, и что производительность и выходные данные будут статистически значимыми.

Далее визуализируется временной ряд, чтобы выявить тренды и сезонность перед обучением LSTM.



Рисунок 3.7- Осадки в Бишкеке (1924-2022гг.)

График показывает значительные колебания уровня осадков с явными периодическими изменениями. Видны тенденции и возможная сезонность.

Следующим шагом является подготовка данных для LSTM-модели:

1. Нормализация данных – LSTM работает лучше с масштабированными значениями.
2. Разделение на обучающую и тестовую выборку – обычно 80% для обучения, 20% для теста.
3. Создание оконных последовательностей – временные ряды требуют подготовки входных данных в виде последовательностей.

Данные для обработки разделены следующим образом: *Обучающая выборка*: 959 записей; *Тестовая выборка*: 240 записей и подготовлены таким образом, что создаются временные окна (последовательности), где предыдущие значения используются для предсказания следующего. Обычно берут 30-дневное окно, но можно настроить этот параметр. Используем его для начала.

Теперь построим и обучим LSTM-модель для прогнозирования осадков.

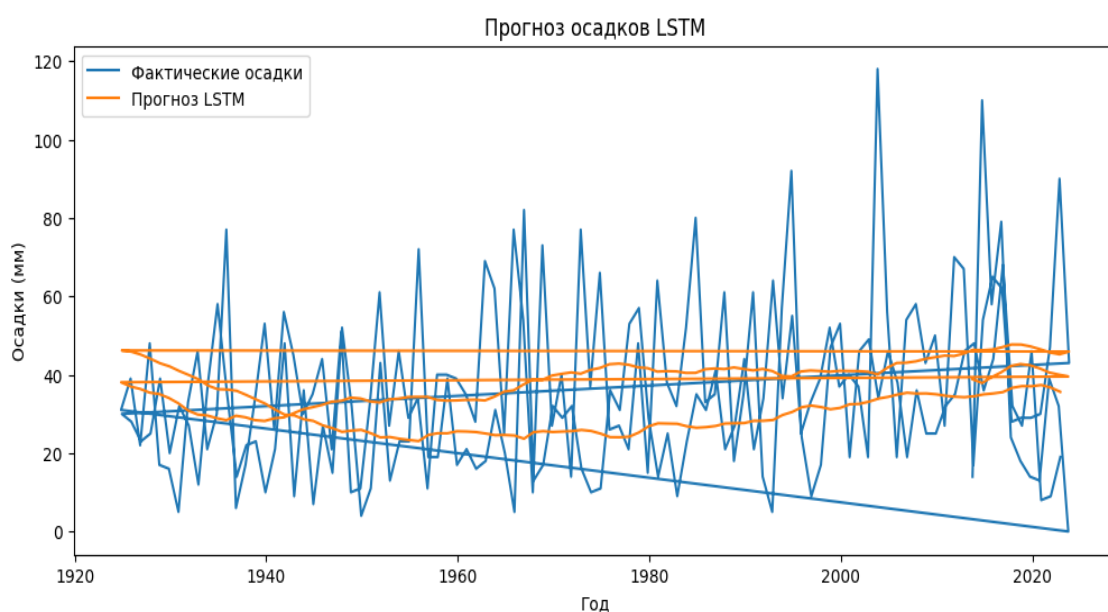


Рисунок 3.8 - Прогноз осадков

На рисунке 3.8. показано прогноз осадков на основе данных 1921-2020гг.



Рисунок 3.9 - Прогноз осадков до 2030г.

На рисунке 3.9. хорошо показан прогноз зелеными линиями, который показывает малое количество осадков. Фактические данные обозначены синими линиями, которые показывают, что после 2020 годов количество осадков снижается.

Сравнение результатов. Оба алгоритма справились с набором данных. Хотя модель XGBoost имеет немного более высокую публичную оценку и немного более низкую оценку проверки, чем модель LSTM, разницу между ними можно считать незначительной.

Следует отметить, что модели LSTM намного быстрее, особенно когда речь идет о больших наборах данных. В заключение следует отметить, что такие факторы, как размер набора данных и доступные ресурсы, будут оказывать огромное влияние на выбор алгоритма.

3.4. Выводы по главе

Анализ климатических изменений в Кыргызской Республике показал, что температура за период с 1885 по 2020 гг. значительно возросла, причем динамика изменений носит нелинейный характер. В последние десятилетия темпы повышения температуры существенно увеличились, особенно с 1970-х годов, что подтверждается графиками температурных трендов.

В среднем в ближайшее десятилетие прогнозируется повышение средней температуры на $1,8^{\circ}\text{C}$. За 90-летний период (1925–2015 гг.) величина повышения среднегодовой температуры составила $1,6^{\circ}\text{C}$ согласно линейным трендам.

Прогноз значений будущих эмиссий парниковых газов (CO_2) полученные с помощью метода GRNN на период 2025-2050 гг., где тренд имеет нелинейный характер.

Для прогнозирования временного ряда осадков за 100 лет использованы LSTM модели нейронных сетей, а также альтернативный метод прогнозирования такой как, XGBoost.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПК ANSYS

4.1. Математическое моделирование турбулентного потока дымовых выбросов

Загрязнение воздуха влияет на здоровье людей и животных, наносит ущерб растительности, почве и материалам, влияет на климат, снижает видимость и солнечную радиацию, создает угрозу безопасности и в целом мешает наслаждаться жизнью и имуществом [25].

Около 60% выбросов приходится на точечные источники. К основным загрязнителям воздуха обычно относят пыль, твердые частицы, PM10 (твердые частицы диаметром 10 микрон и менее) и PM2,5 из-за неполного сгорания топлива или побочных продуктов процесса, оксиды азота (в основном из-за сочетания атмосферного кислорода и азота при высоких температурах), двуокись серы (в основном из-за сжигания топлива, содержащего большое количество серы), окись углерода (из-за не полностью сгоревшего топлива), озон и свинец. Инженерные исследования загрязнения воздуха включают: источники загрязнителей воздуха, контроль загрязнения воздуха, моделирование рассеивания, воздействие загрязнителей воздуха и проектирование сети мониторинга качества воздуха (AQMN-Design).

Математические модели диффузии наиболее полезны в настоящее время, поскольку они предоставляют полезную информацию для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ и быстро обеспечивают выходные данные. Математические модели качества воздуха представляют собой уникальные инструменты [57]:

- принятие законодательства по контролю за выбросами; то есть определение максимально допустимых уровней выбросов, которые будут соответствовать установленным стандартам качества воздуха.

- оценка предлагаемых методов и стратегий ограничения выбросов; то есть оценка воздействия будущих средств контроля

- Выбор мест расположения будущих источников загрязняющих веществ с целью минимизации их воздействия на окружающую среду.

- Планирование контроля за случаями загрязнения атмосферного воздуха; то есть определение стратегий немедленного вмешательства (т. е. систем предупреждения и краткосрочных стратегий сокращения выбросов в режиме реального времени), чтобы избежать эпизодов серьезного загрязнения воздуха в определенных регионах.

- Оценка ответственности за существующие уровни загрязнения воздуха

- Разработка и оптимизация математических моделей AQMN обычно включают модуль подъема шлейфа, который рассчитывает высоту, на которую загрязняющие вещества поднимаются из-за импульса и плавучести, и модуль рассеивания, который оценивает, как они распространяются в зависимости от скорости ветра и стабильности атмосферы.

Стандартные математические модели дисперсии, используемые для моделирования промышленной дисперсии, включают комплекс промышленных источников (ISC), разработанный Агентством по охране окружающей среды США, модели Гаусса (модели шлейфа, затяжки и флуктуации), модель EPA SCREEN, регрессионные модели, простые модели диффузии (блочная модель и

Лаборатория атмосферной турбулентности и диффузии, ATDL), модели теории градиентов, модели, ориентированные на источник и рецептор, и модель множественных ячеек. Более сложные модели могут включать более реалистичные метеорологические обработки, но обычно требуют данных, которые труднее и дороже получить.

Аналитические решения уравнения трехмерной диффузии для приподнятого сплошного точечного источника с переменным ветром и вихревой диффузией получены только при ограниченных предположениях. Ф.Смит [100] использовал степенные вариации для ветра и диффузии и предположил, что

вариация бокового ветра всегда имеет гауссову форму использовал степенной закон для коэффициентов диффузии по y и z , но считал ветер постоянным. Представил важное аналитическое решение, в котором использовались $u = u_1 z^m$, $K_y = K_0 z^m$ и $K_z = K_1 z$, где u — скорость ветра, K_y и K_z — коэффициенты вихревой диффузии в боковом и вертикальном направлениях соответственно. Исследовал эффект изменения значения мощности при постоянном ветре. Максимальная концентрация на уровне земли хорошо согласуется с результатом Гаусса для нейтральной устойчивости атмосферы. Изучал моделирование шлейфов точечных источников на больших высотах с использованием модифицированной модели Гаусса.

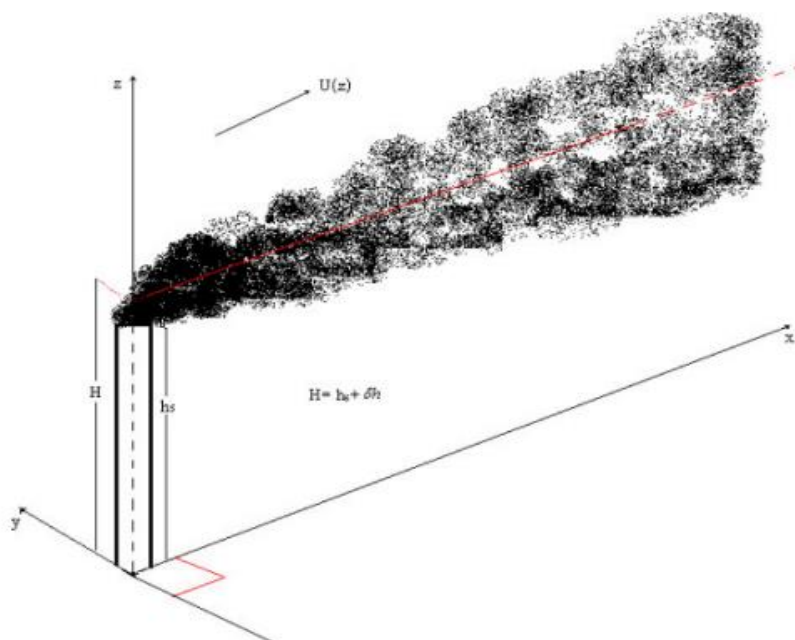


Рисунок 4.1 - Подъем шлейфа и рассеивание загрязнения из промышленной трубы

Для моделирования трехмерного рассеивания загрязнения из точечного источника загрязнителей воздуха от точечных источников можно разбить на следующие этапы:

1. описание геометрии области
2. введение соответствующих граничных условий
3. введение источников, стоков и дисперсионных характеристик для всей

области

4. выбор значений параметров в модели
5. разделение области на ячейки и решение конечно-разностные уравнения
6. визуализация результатов.

При построении модели загрязнения воздуха следует учитывать пять основных физических и химических процессов.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial(U_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(U_y C)}{\partial y} - \frac{\partial(U_z C)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + E - (k_1 + k_2)C + Q(C), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где C — концентрация химических веществ, участвующих в модели (CO , NO_x , SO_2 и TH), U — скорость ветра, K_x , K_y , K_z — коэффициенты диффузии, E — источники выбросов, K — коэффициенты осаждения (для сухого и влажного осаждения соответственно) и $Q(C)$ представляют собой химические реакции. Используются следующие предположения:

1. Стационарные условия ($\partial C / (\partial t) = 0$)
2. $U_y = U_z = 0$ (скорость ветра только в направлении x и является функцией z) [10].
3. Перенос объемным движением в направлении x превышает диффузию в направлении x ($K_x = 0$) [10].
4. Отложений в системе нет ($K_1 = K_2 = 0$).
5. В системе нет реакции ($Q = 0$)

Применяя приведенные выше предположения, уравнение (4.1.) сводится к следующему

$$\frac{\partial(U_x C)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + E \quad (4.2)$$

следующие граничные и начальные условия также используются:

$$x = 0, C(0, j, k) = 0, y = 0, \frac{\partial C}{\partial y} = 0, y = W, \frac{\partial C}{\partial y} = 0, z = 0, \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

Для решения вышеуказанной модели используется метод конечных разностей. Разобьем воздушное пространство на ряд ящиков и запишем уравнение сохранения массы для каждого ящика (как для дифференциального элемента жидкости). Рассмотрим объем «жидкости» со сторонами D_x , D_y и D_z , расположенными в точке $i+1, j, k$. Свойства в точке i, j, k известны, а свойства в плоскости $i+1$ неизвестны. Сохранение массы элемента жидкости при $i+1, j, k$ можно записать как:

$$U_{xk} C_{i+1,j,k} \Delta y \Delta x + \frac{(K_y)_k \Delta x \Delta z (C_{i+1,j,k} - C_{i+1,j+1,k})}{\Delta y} + \frac{(K_y)_k \Delta x \Delta z (C_{i+1,j,k} - C_{i+1,j-1,k})}{\Delta y} + \frac{(K_z)_{k+1/2} \Delta x \Delta y (C_{i+1,j,k} - C_{i+1,j,k})}{\Delta z} + \frac{(K_z)_{k-1/2} \Delta x \Delta y (C_{i+1,j,k} - C_{i+1,j,k=1})}{\Delta z} = U_{xk} C_{i,j,k} \Delta y \Delta x + E^S \Delta y \Delta x \quad (4.4)$$

где значения скорости ветра и вихревой диффузии равны предположительно известным. Это явная алгебраическая формула и может быть нестабильным в некоторых условиях. Стабильность условие для этой системы [64].

$$\Delta x \leq \frac{U_x}{2K_z \left(\frac{5}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \quad (4.5)$$

Атмосферные условия являются движущей силой в формировании,

рассеивании и переносе шлейфов загрязняющих веществ. Для решения уравнения (4.4) нам потребуются такие параметры атмосферы, как скорость ветра, высота подъема шлейфа, категория устойчивости, коэффициенты рассеивания, шероховатость поверхности и другие параметры. Необходимые уравнения и значения для определения этих параметров приведены ниже:

Атмосферная стабильность. Стабильность атмосферы изменяется ежечасно, но для целей моделирования и для коротких периодов времени принималась постоянная и репрезентативная стабильность атмосферы. В предлагаемой программе рассматриваются три класса устойчивости атмосферы (нейтральная, устойчивая и неустойчивая). Стабильность атмосферы рассчитывается с использованием следующего уравнения (4.6):

$$L = \frac{u^{*3} C_p \rho T}{kg H_n} \quad (4.6)$$

В уравнении (4.6) u^* — скорость трения, C_p — удельная теплоемкость воздуха, T — температура воздуха, k — постоянная Кармана ($k = 0,4$), g — гравитационная постоянная, а H_n — чистое тепло, поступающее в атмосферу. H_n для нейтральной атмосферы равно 0, для стабильной атмосферы 42 и для неустойчивой атмосферы равно 175 [65]. Заметим, что L (длина Монона-Обухова) — это просто высота над землей, на которой производство турбулентности как механическими, так и граничными силами равно [2] и имеет единицы длины.

Шероховатость поверхности и скорость трения. Это удобно ввести коэффициент лобового сопротивления c_g , основанный на геострофическом ветре, такой, что:

$$u^* = c_g u_g \quad (4.7)$$

Коэффициент геострофического сопротивления является функцией

поверхность Число Россби и L , где f — параметр Кориолиса Земли, а Z_0 — поверхность шероховатости. Леттау предлагает следующие эмпирические соотношения для нейтральной атмосферы [12]:

$$c_g = \frac{0.16}{(R_0) - 1.8} \quad (4.8)$$

Для устойчивой и неустойчивой атмосферы необходимо умноженные на 0,6 и 1,2 соответственно. Ценности Длина шероховатости (Z_0) и скорость трения (u^*) для нескольких различных земных поверхностей.

Подъем Плюма. Когда загрязняющие вещества выбрасываются в воздух из стопки, они поднимаются над стопкой, прежде чем дрейфовать значительное расстояние по ветру. Эффективная высота H — это не только физическая высота стека h_s , но и высота включают также подъем шлейфа.

$$H = h_s + \delta h \quad (4.9)$$

Высота штабеля, используемая в расчетах, должна быть эффективная высота штабеля. Обычно уравнение Бригга (4.10) и уравнение Холланда (4.1) используются для прогнозирования подъема шлейфа. Уравнения Бригга и Холланда имеют вид заданные уравнениями (4.10) и (4.11) соответственно

$$\delta h = \frac{114CF^{1/4}}{u}, F = \frac{V_s g D^2 (T_s - T_a)}{4T_a}, C = 1.58 - 41.4 \frac{\Delta \theta}{\Delta z} \quad (4.10)$$

$$\delta h = \frac{V_s}{u} \left(1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P D \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \right) \quad (4.11)$$

где v_s — скорость выхода штабеля (м/с), D — штабель диаметр (м), u — измеренная скорость ветра (м/с) или рассчитанное на высоте h_s , P — давление (мбар), t_s — температура дымового газа (К), T_a — температура атмосферы (8К), Dy/Dy_z — потенциальная разность температур (8К/м). Предсказания уравнений

Бриггса и Холланда сравниваются с экспериментальными данными Снайдера [13]. Видно, что оба уравнения не дают хороших прогнозов. Поэтому можно изменить уравнение Холланда, чтобы получить лучший набор коэффициентов.

Высота смешивания. Объем, доступный для разбавления загрязняющих веществ в атмосфере, определяется смешиванием высоты. Связь между классами устойчивости и высота смешивания указана в Бейчок [14].

С помощью программы можно легко изучить влияние метеорологических параметров, таких как стабильность атмосферы, скорость ветра, температура воздуха, шероховатость поверхности и коэффициент рассеивания, на рассеивание загрязняющих веществ. Использование программы для изучения влияния параметров дымовой трубы, таких как температура на выходе, скорость на выходе, высота дымовой трубы и концентрация на выходе, также будет проиллюстрировано в этом разделе.

Влияние атмосферной стабильности: Как показано на рисунке 4.1, распределение загрязняющих веществ лучше для нестабильных условий, и загрязняющие вещества не уходят далеко от дымовых труб.

Влияние скорости на выходе: Когда скорость на выходе увеличивается, подъем шлейфа увеличивается, увеличивается рассеивание загрязняющих веществ и, наконец, снижается концентрация на уровне земли.

Вышеупомянутые прогоны моделирования ясно иллюстрируют полезность программы в помощи лицам, принимающим решения о борьбе с загрязнением воздуха и последствиях различных переменные по рассеиванию загрязнения.

1. В зимних условиях в местах, удаленных от дымовых труб, наблюдаются более высокие концентрации загрязняющих веществ, а в летних условиях больше всего страдают места, расположенные вблизи дымовых труб.

2. При увеличении высоты дымовых труб загрязняющие вещества поднимаются в атмосферный слой, и загрязнение рассеивается по более широкой области, а концентрация на уровне земли снижается.

3. Увеличение скорости и температуры выхода дымовых газов приводит к уменьшению концентраций на уровне земли.

4. Снижение концентрации на выходе также может быть достигнуто за счет снижения уровня выбросов. Этого можно достичь, например, путем установки устройств управления и/или модернизации заводов с использованием новых технологий.

4.2. Численное моделирование диффузии загрязняющих веществ в атмосфере в ANSYS CFX

В диффузионной модели распространения дыма из дымовой трубы (три трубы) выведены уравнения, определяющие концентрацию дыма в стационарном случае и переход на нестационарный зависящий от времени концентрации дыма. [54] Исследованы влияние метеорологических параметров и параметров дымовой трубы на рассеивание загрязняющих веществ, таких как скорость ветра, температура окружающего воздуха, стабильность атмосферы, температура на выходе дымовой трубы, скорость и высота дымовой трубы.

ТАБЛИЦА.4.1 - Параметры моделирования объекта

Длина куба L1	Ширина куба L2	Высота куба H	Диаметр выхода 1 трубы (outlet1)	Диаметр выхода 2 трубы (outlet2)	Диаметр выхода 3 трубы (outlet3)
600m	100m	200m	20m	25m	15m

На основе вышеуказанных параметров в табл. 4.1. строится геометрия объекта в 3D моделировании как показано на рисунке 4.1. Куб - означает пространство с параметрами указанными в табл.4.1., который имеет длину - L1, ширину -L2 и высоту - H, где происходит процесс выбросов загрязнителей в атмосферу из трех дымовых труб (outlet1, 2, 3) соответствующими диаметрами

вентиляционных отверстий трех труб задаются размерами -(20m, 25m, 15m).

Создание геометрической модели компонента “Geometry”

По выше приведенному примеру создаются объекты. В данном случае 3 трубы, и пространство.

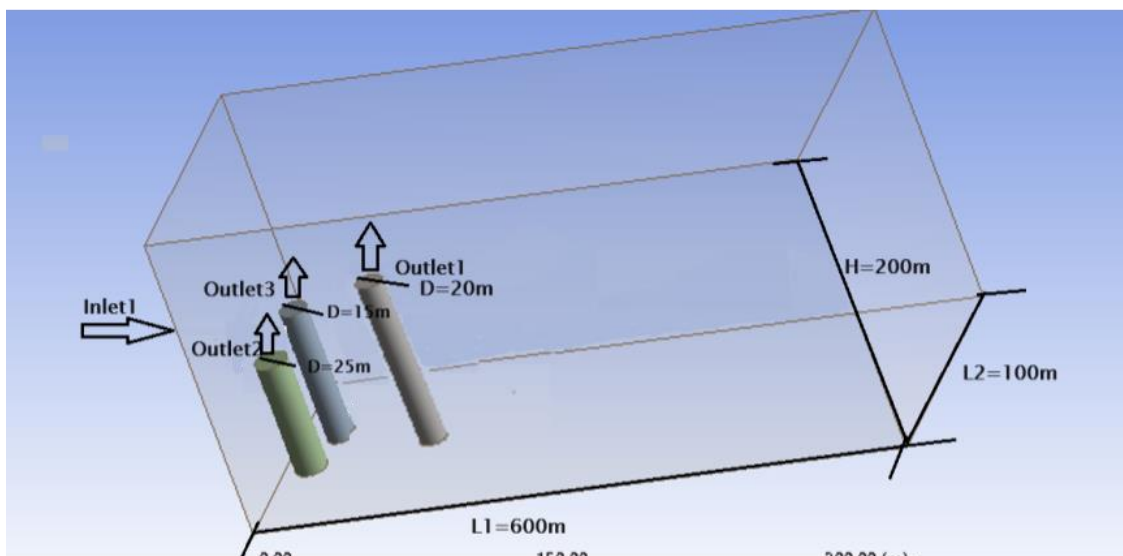


Рисунок.4.1- Геометрия объекта

В правой части окна в виде дерева показаны элементы объектов на рисунке.4.2.

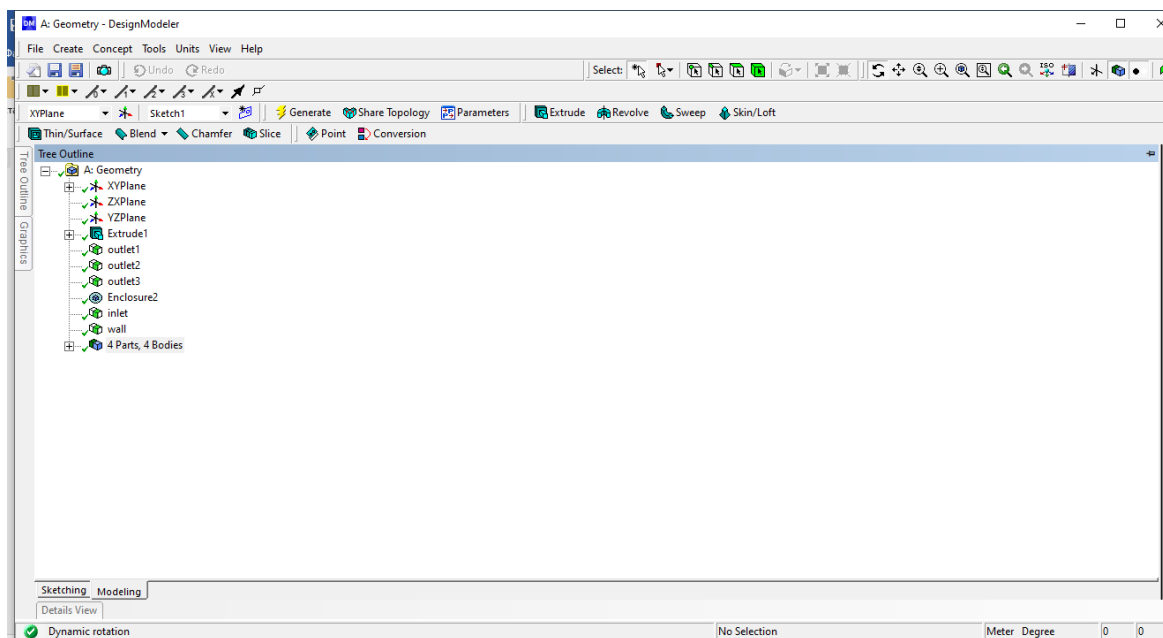


Рисунок 4.2 - Дерево объекта

На основе геометрии объекта строится сетка (Meshing) определяются параметры сетки “Meshing”: определяем метод - Automatic Method (Автоматический метод), Scoping Method (Метод определения объема). Задается

параметр - Element size (Размер элемента)- 4m. Процесс (Meshing) - отображен на рисунке 4.3.

Создание сеточной модели Meshing с компонентом “Mechanical Model”.

По аналогичным способом вышеуказанного примера определяются параметры сетки “Meshing” - метод и размер.

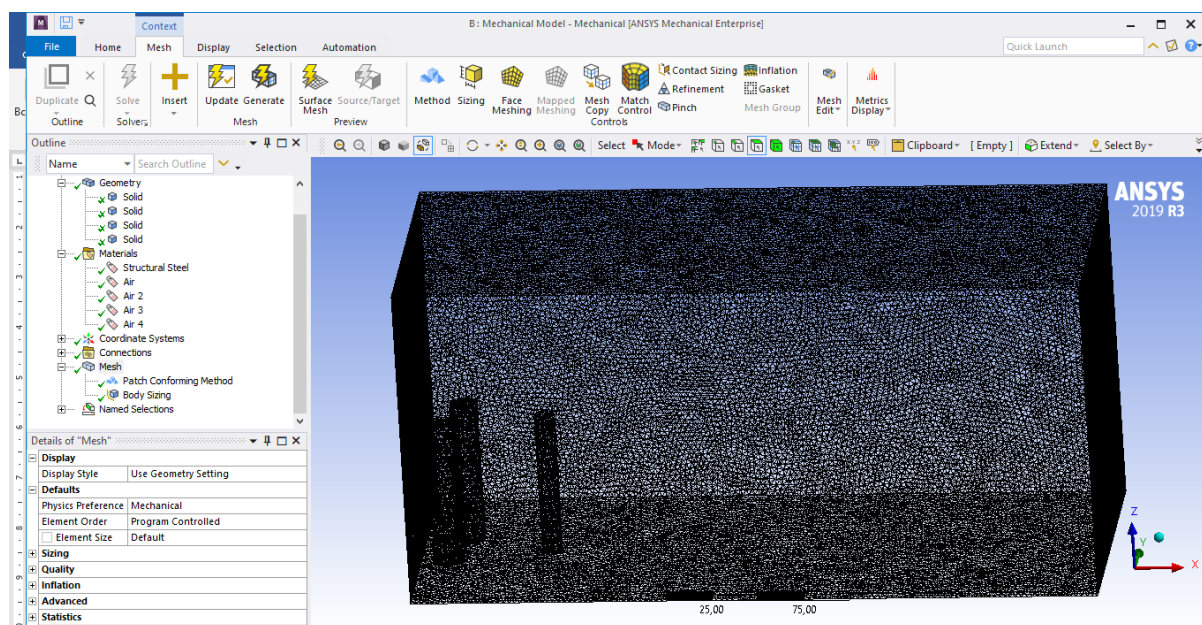


Рисунок 4.3 - Определение граничных условий в CFX

Для настройки симуляции автоматически нужно запустить CircVent. на рисунке 4.4. Нужно переходить к разделу Steady-State and Transient Configuration и настроить симуляцию.

Сначала проводится анализ в установившемся режиме, при котором из дымохода не выделяется дым. Второй анализ берет настройку для устойчивого состояния и адаптирует ее для анализа переходных процессов. РЕЗУЛЬТАТ анализа установившегося режима будет использоваться в качестве первоначального предположения для анализа переходных процессов [99].

1. в CFX выбираем - Файл (file) -новый случай (New Case)
2. выбрать общие (General) и нажмите ОК
3. выбрать file - Save case as сохранить регистр как
4. установить File name имя файла Circvent.

5. нажать Save «Сохранить»

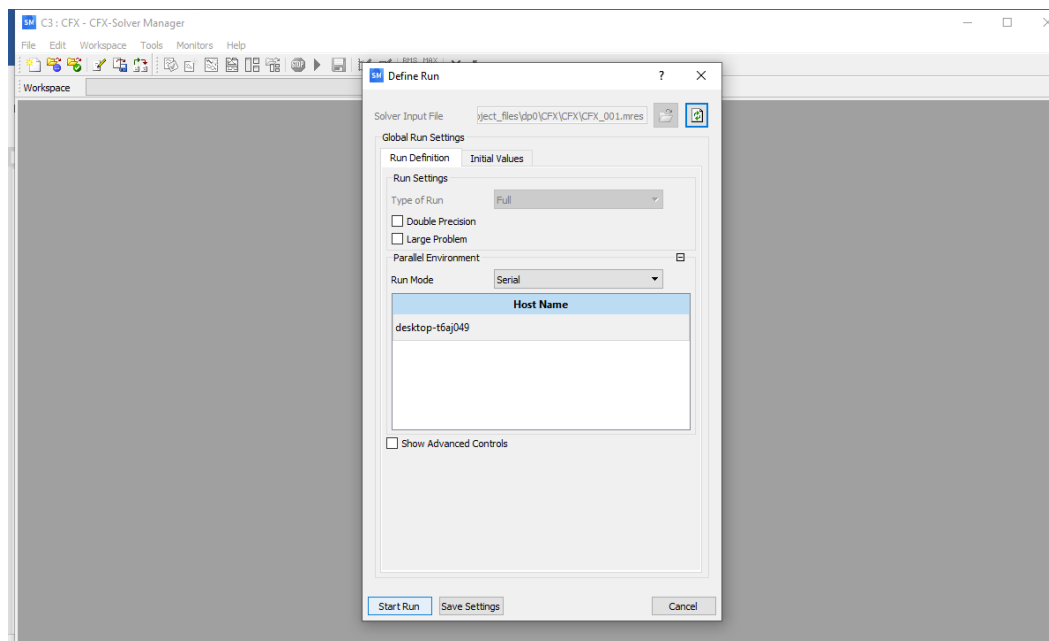


Рисунок 4.4 - Настройки симуляции

Создание дополнительной переменной. На данном этапе создается дополнительная переменная на рисунке 4.5. (Additional variable) (нереагирующая скалярная составляющая) будет использоваться для моделирования рассеивания дыма из вентиляционного отверстия.

1. Выберите в главном меню пункт Insert > Expressions, Functions and Variables > Additional Variable (Вставка > Выражения, функции и переменные > Дополнительные переменные) или нажмите на кнопку *Additional Variable* (Дополнительные переменные) .

2. Укажите имя переменной smoke (Дым).

3. Нажать OK.

4. В качестве типа переменной Variable Type выберите Volumetric (Объемный).

5. Задайте единицы измерения Units - [kg m⁻³].

6. Нажать OK.

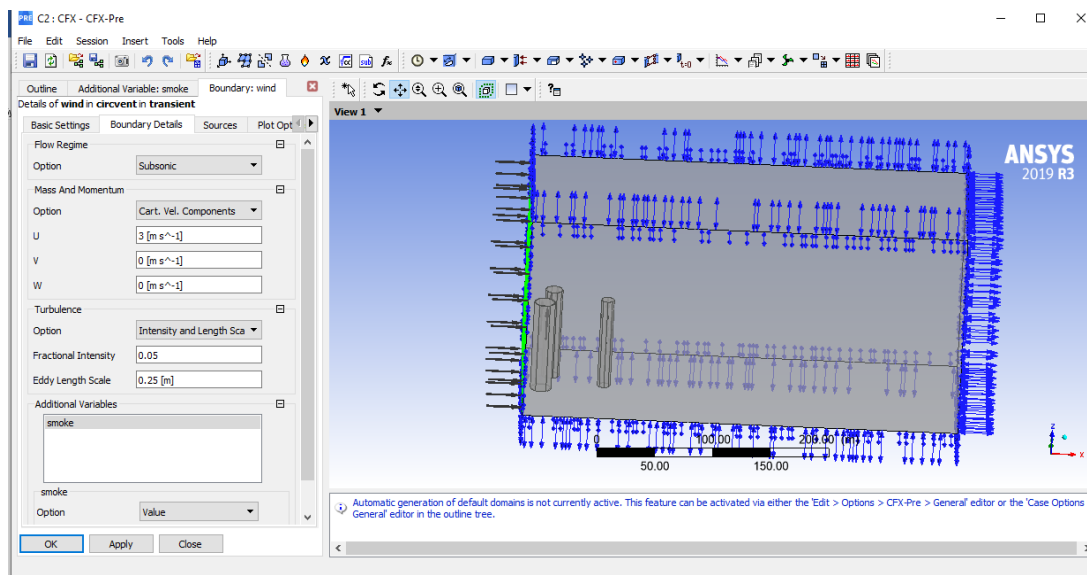


Рисунок 4.5 - Создание дополнительной переменной

появятся остаточные графики для шести уравнений: U-мом, V-мом, w-мом, p-mass, k-TurbKE и E-diss.K (три уравнения сохранения импульса, уравнение сохранения массы и уравнения для кинетическая энергия турбулентности и диссипация турбулентных вихрей (momentum conservation equations, the mass conservation equitation and equations for the turbulence kinetic energy and turbulence eddy dissipation)). Вкладка «Импульс и масса» содержит 4 графика, а два других находятся в разделе «Количества турбулентности». остаток для уравнения дыма также отображается, но не регистрирует никаких значений, поскольку он не инициализируется/

В стационарной симуляции, используется поддержка инициализации значений решателем ANSYS 2019 R3 CFX-Solver оставив инициализацию всех данных, получаем графики на рисунке 4.6. и рисунке 4.7.в режимах (Streamline) и (Isosurface).

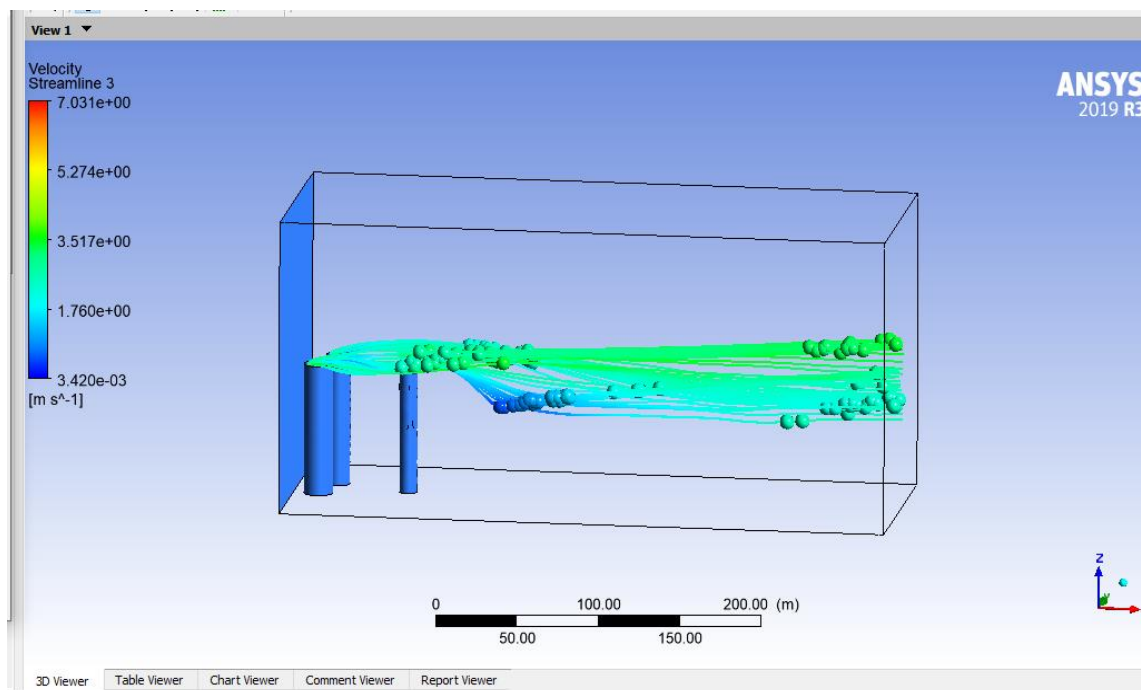


Рисунок 4.6 - Распространение загрязнителей воздуха в режиме (Streamline)

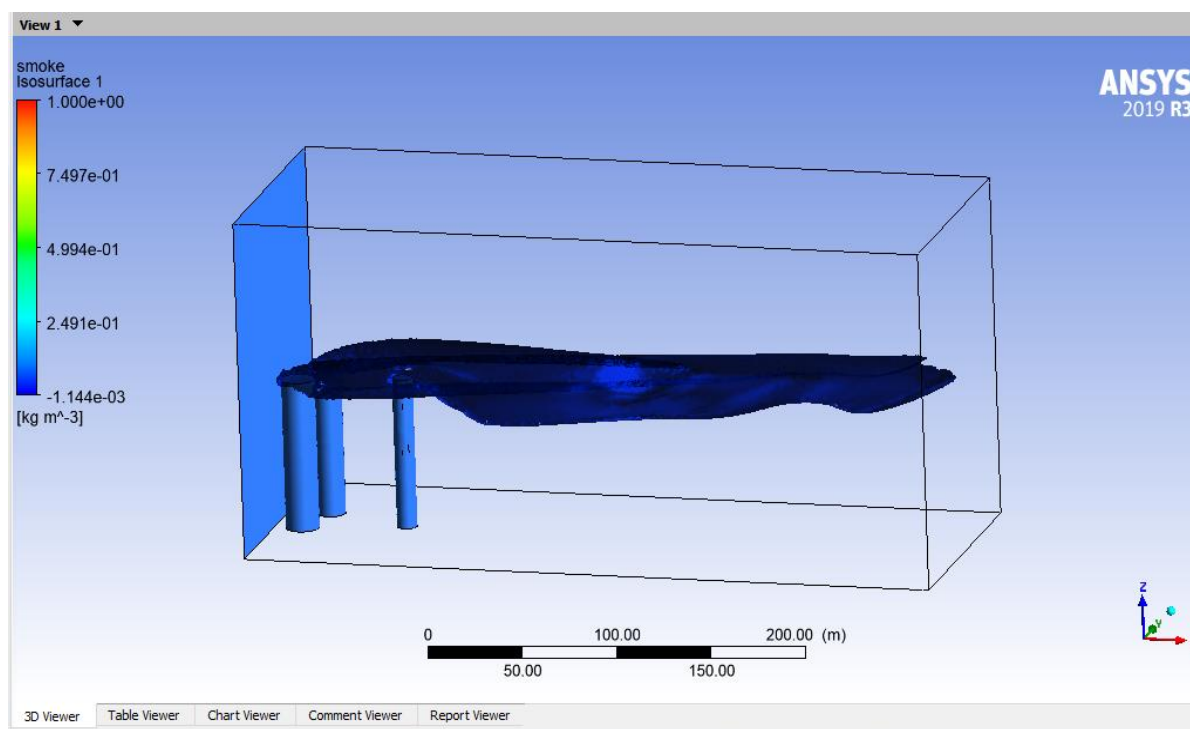


Рисунок 4.7 - Распространение загрязнителей воздуха в режиме(Isosurface)

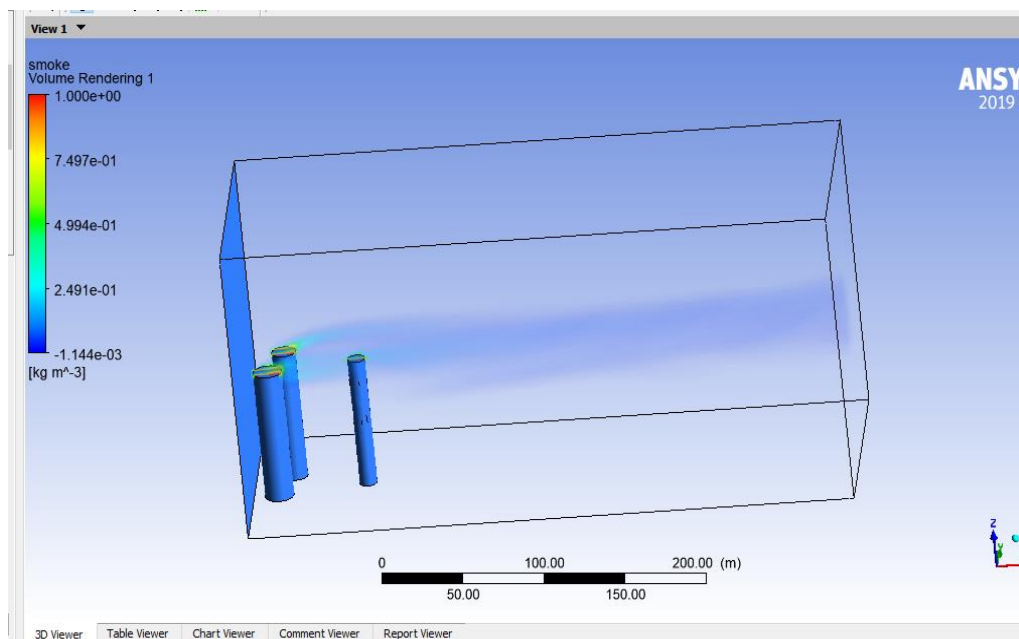


Рисунок 4.8 - Распространение загрязнителей воздуха в режиме(Transparency)

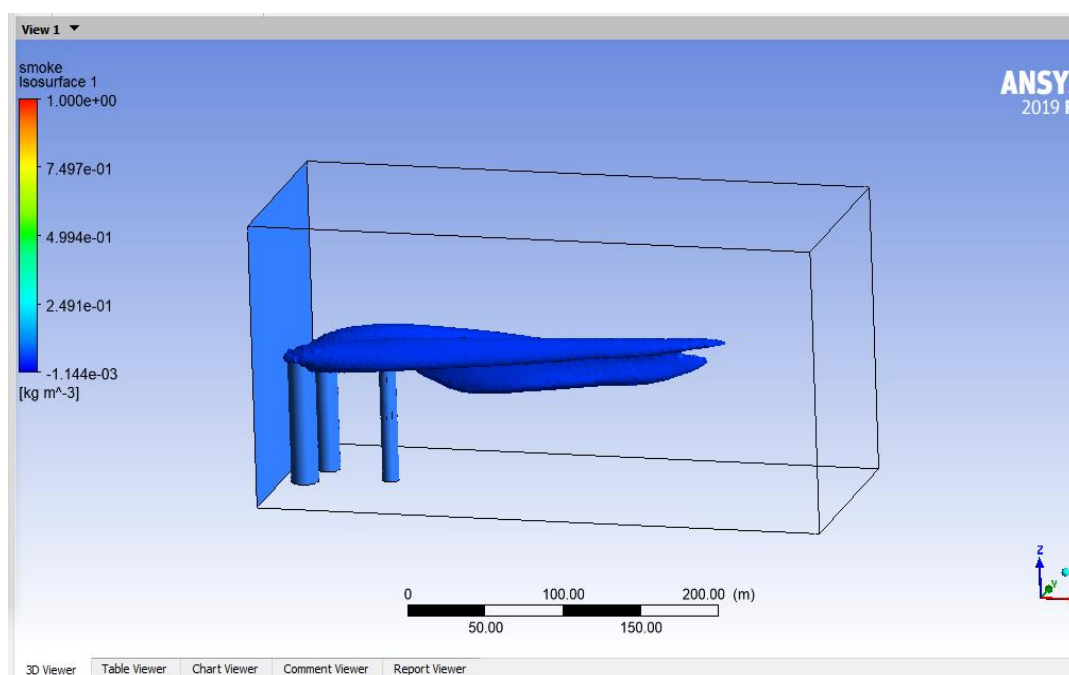


Рисунок 4.9 - Распространение загрязнителей воздуха в режиме анимации

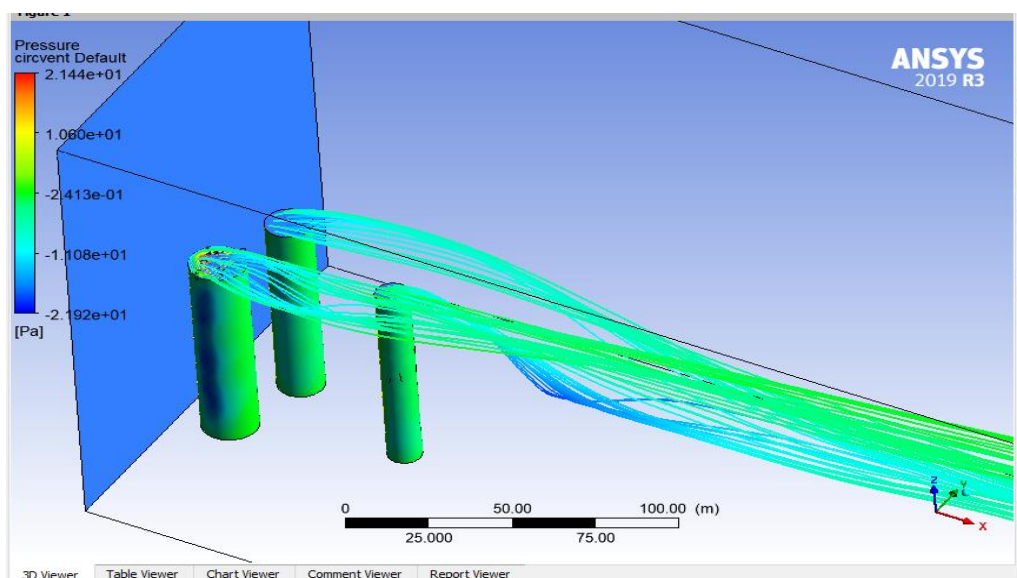


Рисунок 4.10 - Распространение загрязнителей воздуха в режиме Rainbow

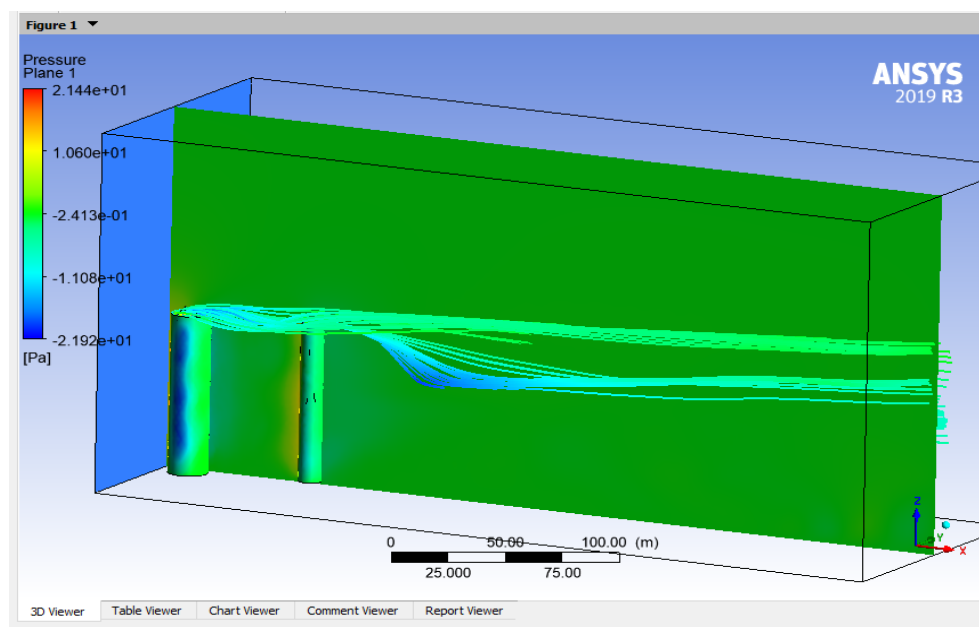


Рисунок 4.11 - Распространение загрязнителей воздуха в разрезе

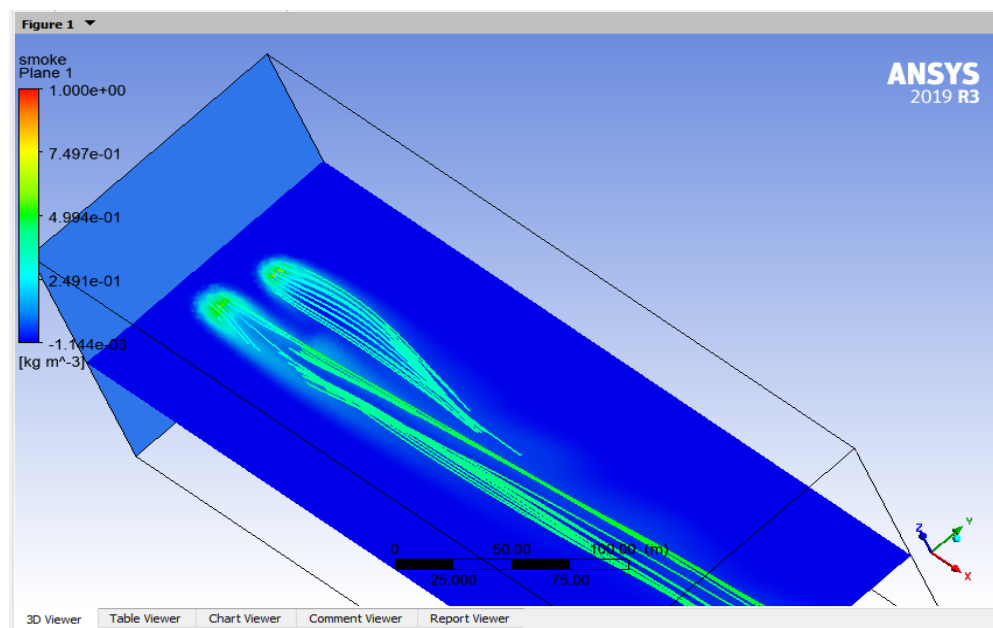


Рисунок 4.12 - Распространение загрязнителей воздуха в разрезе сверху

4.3. Влияние метеорологических параметров и препятствий на траекторию выбросов в ANSYS Fluent

Для моделирования объекта данные приведены в таблице 4.2.

ТАБЛИЦА 4.2 - Параметры моделирования объекта

№	Данные модели	Ед изм.
1.	Длина пространства (куба) L1	600м
2.	Ширина пространства (куба) L2	100м
3.	Высота пространства (куба) H1	200м
4.	Диаметр выхода дыма из дымовой трубы (outlet1)	20м
5.	Высота дымовой трубы H2	150м
6.	Длина здания L3	50м
7.	Ширина здания L4	16м
8.	Высота здания H3	25м
9.	Расстояние между дым.трубы и здания L5	300м
10.	Скорость ветра	3м/с
11.	Скорость дыма из дымовой трубы	1м/с
12.	Температура пространства	150С
13.	Температура дыма из дымовой трубы	300 0С

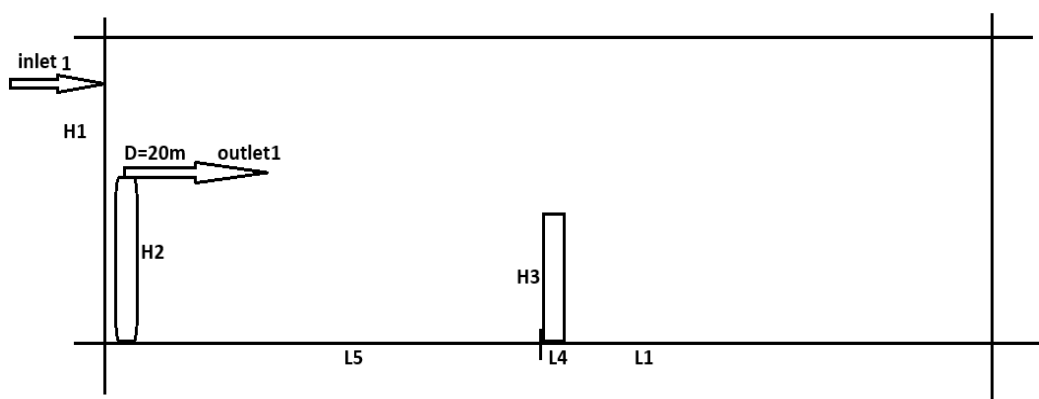


Рисунок 4.13 - Модель объекта с параметрами

На основе вышеуказанных параметров в табл. 4.2. строится геометрия объекта в 3D моделировании как показано на рисунке.4.14. Куб - означает пространство с параметрами, указанными в табл.1., который имеет длину - $L1$, ширину - $L2$ и высоту – $H1$, где происходит процесс обтекание дыма из дымовой трубы на здание (стрелка - outlet1), диаметр отверстие трубы - (20м).

Расстояние между дымовой трубой и здания составляет 300м.

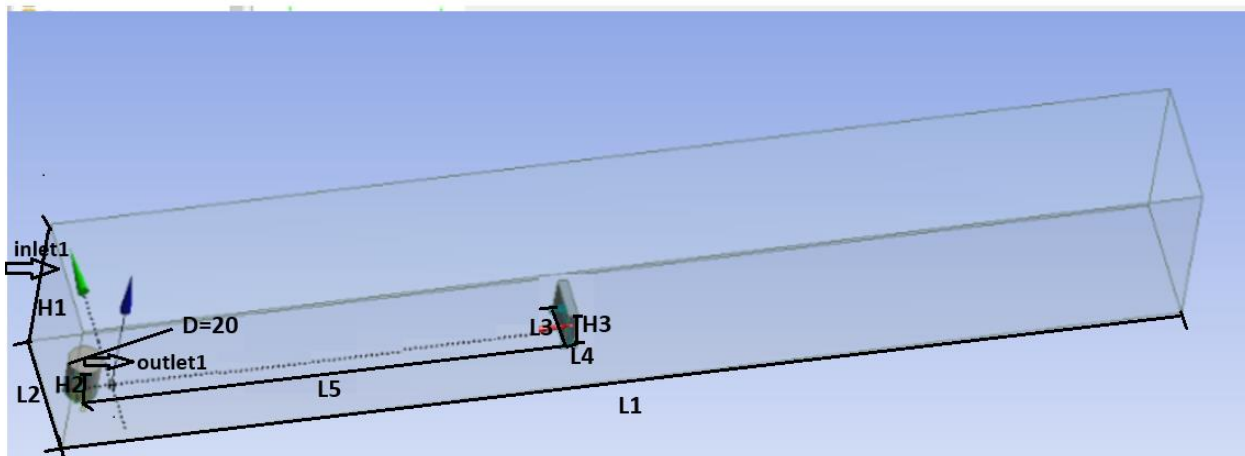


Рисунок 4.14 - Геометрия модели дымовой трубы и здания в пространстве.

Платформа Workbench имеет модульный принцип описания расчетного проекта, что позволяет наглядно представить последовательность проведения всех расчетов, а также систематизировать и хранить полученные результаты. Пользовательский интерфейс Workbench (Рисунок 4.15.) содержит следующие панели и окна:

1 – окно Project Schematic, в котором отображается схема проекта, включающая набор используемых в проекте модулей и приложений;

2 – панель инструментов объединяет общие настройки и опции проекта, позволяющие производить операции с файлами, настраивать вид отображения графической информации в проекте, устанавливать глобальные настройки для отдельных модулей проекта, включая решатели (свойства импорта и экспорта геометрических моделей, возможности повышения производительности вычислений и т. д.), а также выбирать единицы измерения, используемые в

проекте, и интегрировать в рабочую среду собственные программные приложения (расширения);

3 – панель Properties содержит описание свойств выделенного в окне Project Schematic объекта. По умолчанию панель свойств скрыта и вызывается пользователем через контекстное меню выбранного объекта. Панель представляет собой таблицу из двух столбцов. В первом столбце перечисляются названия свойств, а во втором – их значения. Все свойства имеют некоторые значения, заданные по умолчанию. Если значение какого-либо свойства отображается на сером фоне, то оно не может быть изменено пользователем;

4 – панель Toolbox отображает все доступные модули и приложения, интегрированные в среду Workbench. Набор доступных модулей зависит от типа лицензии ANSYS.

Панель Toolbox всегда включает пять разделов:

1) раздел Analysis Systems содержит готовые шаблоны для различных типов численного анализа.

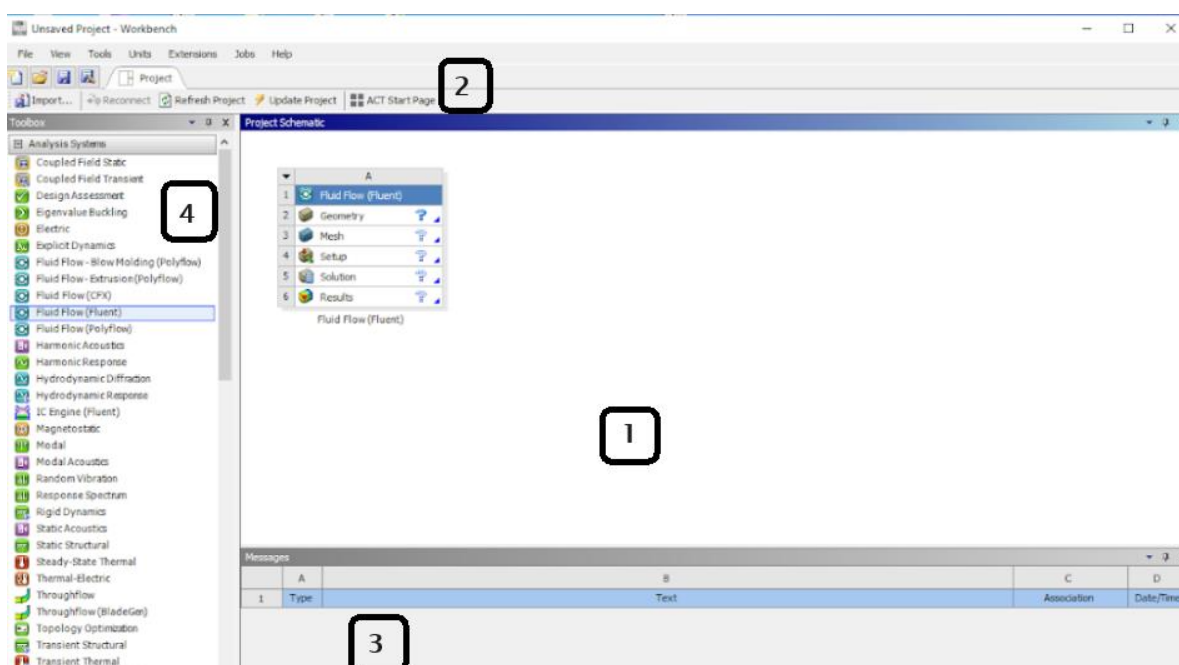


Рисунок 4.15 - Интерфейс Workbench

Каждый шаблон имеет ядро в виде определенного решателя (Fluent, CFX, Static

Structural и т. д.), а также включает вспомогательные модули для подготовки геометрической модели (Design Modeler), конечно-элементной или конечно-объемной модели (Meshing), задания свойств материалов (Engineering Data) и постобработки результатов расчета (Results).

На рисунке 4.16. Изображен пример шаблона Fluid Flow (Fluent) для моделирования дымовой трубы и здания с использованием решателя Fluent. Для добавления шаблона в проект достаточно перетащить его с панели Analysis System в рабочее пространство проекта Project Schematic.

2) раздел Analysis Systems включает основные и вспомогательные модули, используемые при решении задач. Так, в рабочее пространство проекта может быть отдельно добавлен компонент для построения геометрической модели, постобработки результатов и т. д.

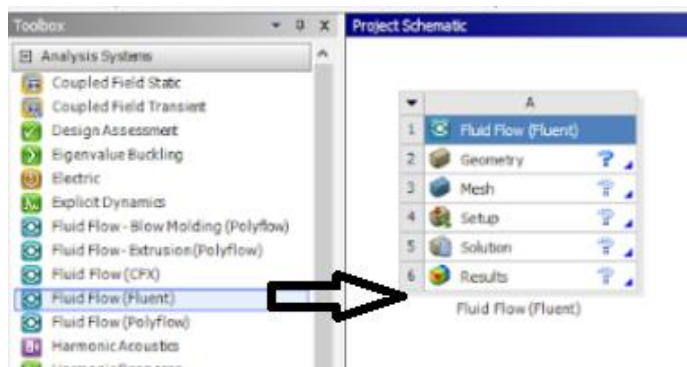


Рисунок 4.16 - Шаблон Fluid Flow (Fluent)

3) в разделе Custom Systems содержатся готовые связки шаблонов для решения междисциплинарных задач.

4) раздел Design Exploration позволяет решать задачи оптимизации для параметров, которые задаются в интерфейсе Parameter Set (набор параметров);

5) раздел External Connection Systems позволяет интегрировать пользовательские внешние приложения и процессы в проект

Обзор основных модулей и приложений, используемых в ANSYS Workbench для подготовки и проведения численного анализа.

Engeneering Data – интерфейс для управления базой данных физических и

механических свойств материалов, а также входных параметров математических моделей.

Design Modeler (пункт Geometry в разделе Component Systems) – приложение для создания геометрических 2D/3D-моделей. Также модуль может работать с импортированной из сторонних CAD-комплексов геометрией: позволяет исправлять дефекты в геометрии, изменять или упрощать геометрическую модель.

Meshing (пункт Mesh в разделе Component Systems) – многофункциональный сеточный препроцессор, который позволяет генерировать высококачественные расчетные сетки в автоматическом режиме для различных типов инженерного анализа. Модуль предоставляет широкий набор инструментов для построения расчетных сеток на основе треугольных и четырехугольных элементов для 2D-моделей и на основе тетраэдров, гексаэдров или пирамидальных элементов для 3D-моделей. В программе заложены алгоритмы для построения структурированных и неструктурированных расчетных сеток, а также возможности качественного разрешения расчетной сетки вблизи твердых стенок и других особенностей моделей, что особенно важно для гидродинамического анализа.

Static Structural предназначен для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке. При использовании командных вставок на языке APDL функционал модуля может быть расширен для решения, например, связанных задач (термоупругость, пороупругость, электроупругость и т. д.).

Transient Structural – модуль для решения задач динамики конструкций. Основан на неявных схемах интегрирования уравнений движения.

Explicit Dynamics/AUTODYN/LS-DYNA – модули, основанные на явных решателях для расчета задач динамики конструкций и моделирования быстропротекающих нелинейных процессов: высокоскоростных ударов, пробитий, фрагментации, разрушения и т. д.

Rigid Dynamics предназначен для моделирования динамики подвижных систем, механизмов. Кинематика механизма описывается путем задания систем координат, связанных с деталями, и выбора параметров, которые однозначно определяют взаимное положение деталей и конфигурацию всего механизма. Перемещения тел описываются уравнениями движения в форме Кейна [4], что обеспечивает высокую точность и скорость решения задачи.

Steady-State Thermal/Transient Thermal – анализ установившегося/нестационарного теплового поля на основе решения уравнения стационарной/нестационарной теплопроводности.

Fluid Flow (CFX) предназначен для решения задач гидродинамики, а также задач сопряженного теплообмена. Позволяет моделировать широкий спектр физических процессов в жидкостях и газах, таких как нестационарность, турбулентность, многокомпонентность и многофазность среды, химические реакции, радиационное излучение, акустические волны и т. д. Хорошо зарекомендовал себя в задачах турбомашиностроения, где необходимо моделирование течений жидкостей и газов в условиях вращающихся механизмов.

Fluid Flow (Fluent) имеет аналогичный модулю CFX функционал, однако содержит более широкий спектр моделей и методов для моделирования течений с химическими реакциями. Также обладает встроенным редактором расчетных сеток.

1. Создание геометрической модели компонента “Geometry”

По выше приведенному примеру создаются объекты. В данном случае пространство, дымовая труба и здание.

Этап создания геометрии осуществляется нажатием на “Geometry” из Fluid Flow (Fluent), открывается окно которая изображена на рисунке 4.17.

В правой части окна показаны компоненты “Дымовой трубы”:

Extrude - форма (цилиндр) дымовой трубы

Inlet 1 - вход дымовой трубы

wall 1 - ствол дымовой трубы

Outlet 1 - выход дыма из дымовой трубы

Enclosure - пространство дымовой трубы

Inlet 2 - вход пространства дымовой трубы

wall 2 - пространство дымовой трубы

Outlet 2 - выход пространства дымовой трубы

2 Parts. 2 Bodies - определение жидких (газообразующее) тел (дымовую трубу, пространство).

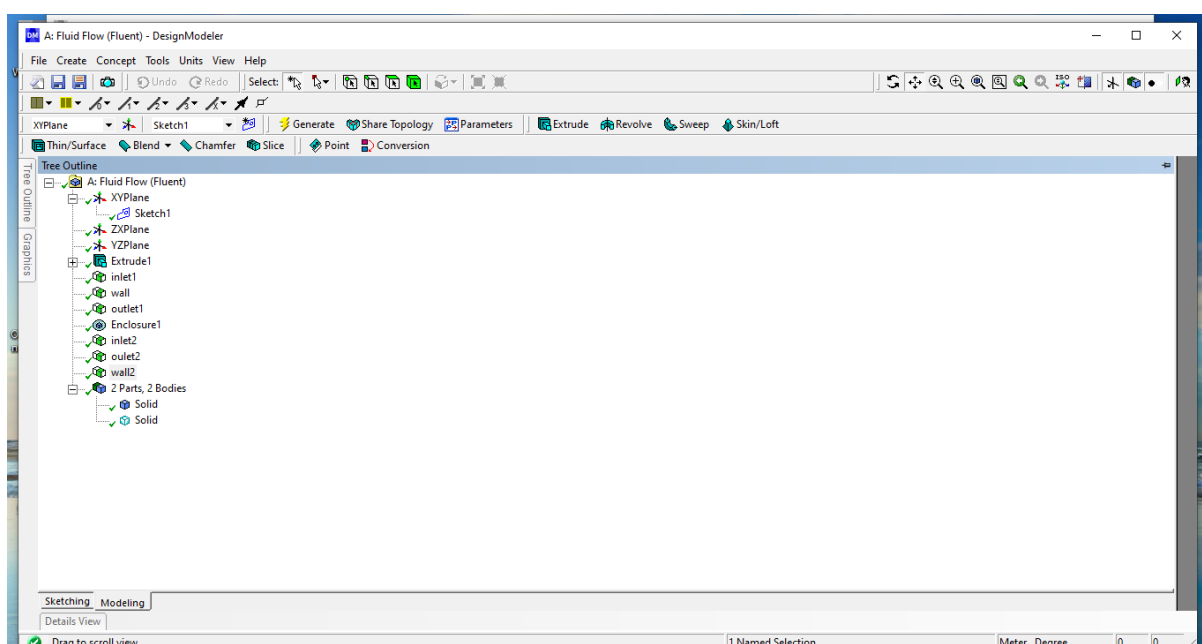


Рисунок 4.17 - Построение геометрии дымовой трубы и препятствия (здания).

Построенная модель дымовой трубы в пространстве изображен на рисунке 4.18.

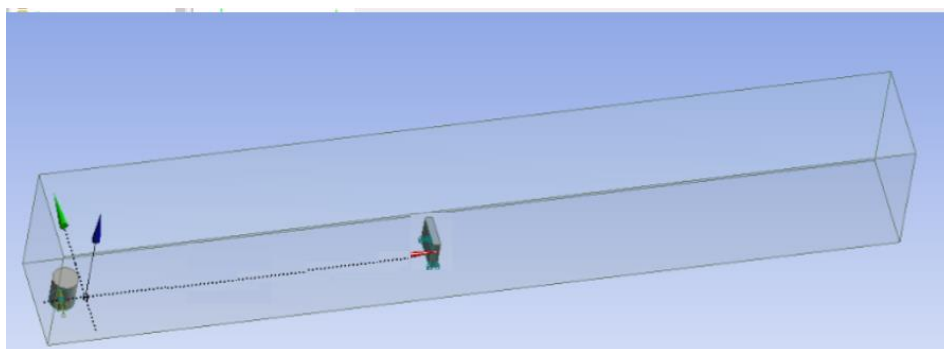


Рисунок 4.18 - Модель дымовой трубы.

При работе в Workbench сохранение модели после окончания её построения происходит автоматически при закрытии Design Modeler, а в строке Geometry появляется зеленая галочка, если модель (дымовая труба и здание) построена без ошибок (Рисунок 4.19).

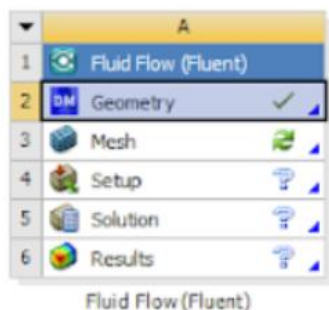


Рисунок 4.19 - Компоненты построенной модели Fluid Flow(Fluent)

При этом в строке сетки (Mesh) отображаются зеленые стрелочки, что означает, что входная информация данного блока изменилась и требуется обновление.

2. Работа в интерфейсе Meshing

Представлена рабочая область модуля симуляции. Раздел сетки элементов (Mesh) располагается в дереве проекта и позволяет управлять настройками сетки. При нажатии левой кнопки мыши на разделе Mesh изменяется вид панели инструментов, в которую выводятся основные команды работы с сеткой. Все доступные команды также можно вызвать через контекстное меню, вызываемое нажатием правой кнопки мыши на разделе Mesh. Запускается Mesh – Edit на рисунке 4.20.

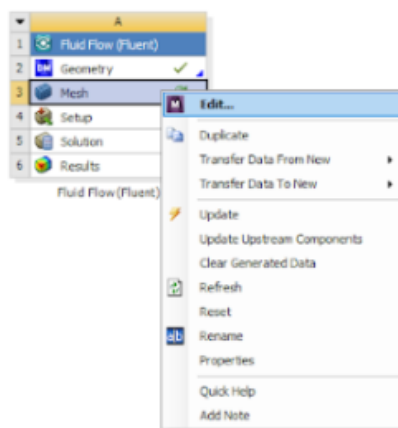


Рисунок 4.20 - Запуск компонента «Mesh» для модели

Аналогично, после построения сетки и последующего закрытия ANSYS Meshing, выполняется автосохранение сеточной модели с последующим автоматическим импортом в ANSYS Fluent (Рисунок 4.20.). Окно Fluent (Рисунок 4.21.) состоит из графического окна, в котором можно видеть загруженную модель, окна текстовых сообщений, в которое выводятся результаты выполнения команд, дерева проекта и панели инструментов. В зависимости от того, какой пункт выбран в дереве проекта, открывается соответствующая панель. Окно Fluent (Рисунок 4.21.) состоит из графического окна, в котором можно видеть загруженную модель, окна текстовых сообщений, в которое выводятся результаты выполнения команд, дерева проекта и панели инструментов. В зависимости от того, какой пункт выбран в дереве проекта, открывается соответствующая панель.

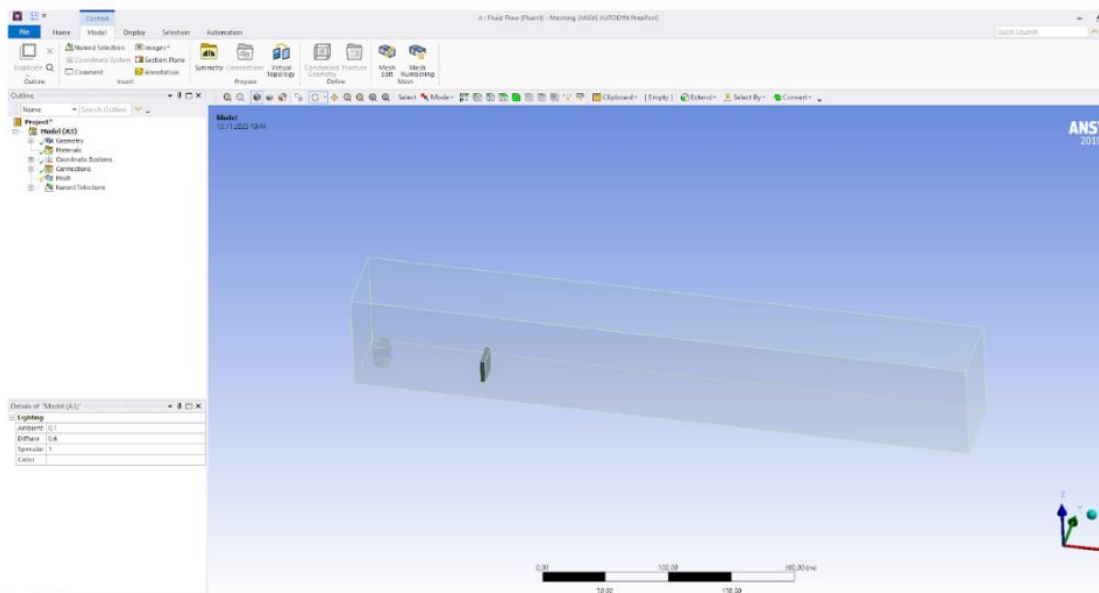


Рисунок 4.21- Окно построение сетки «Mesh»

Для запуска построения сетки нужно нажать кнопку Update или Generate Mesh на панели инструментов (Рисунок 4.22). Через какое-то время генерация сетки закончится, и если в дереве проекта выбрать элемент Mesh, можно увидеть расчётную сетку. Индикатор состояния элемента Mesh примет вид зелёной галочки.

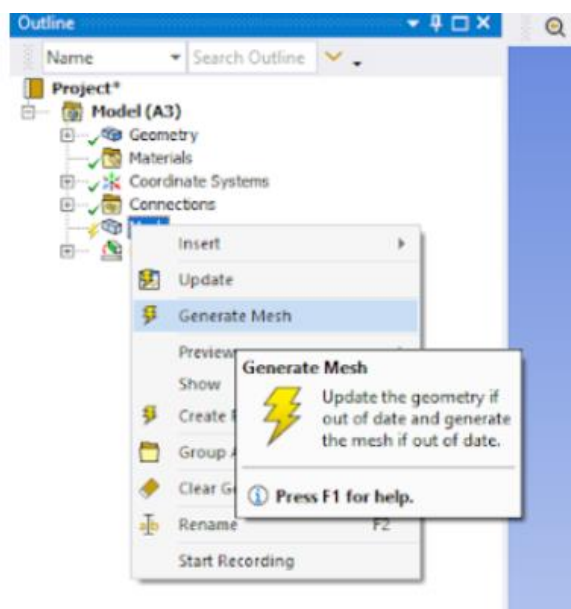


Рисунок 4.22 - Генерация сетки

Определяется метод - Automatic Method, Scoping Method -Geometry Selection,

Geometry - Apply.

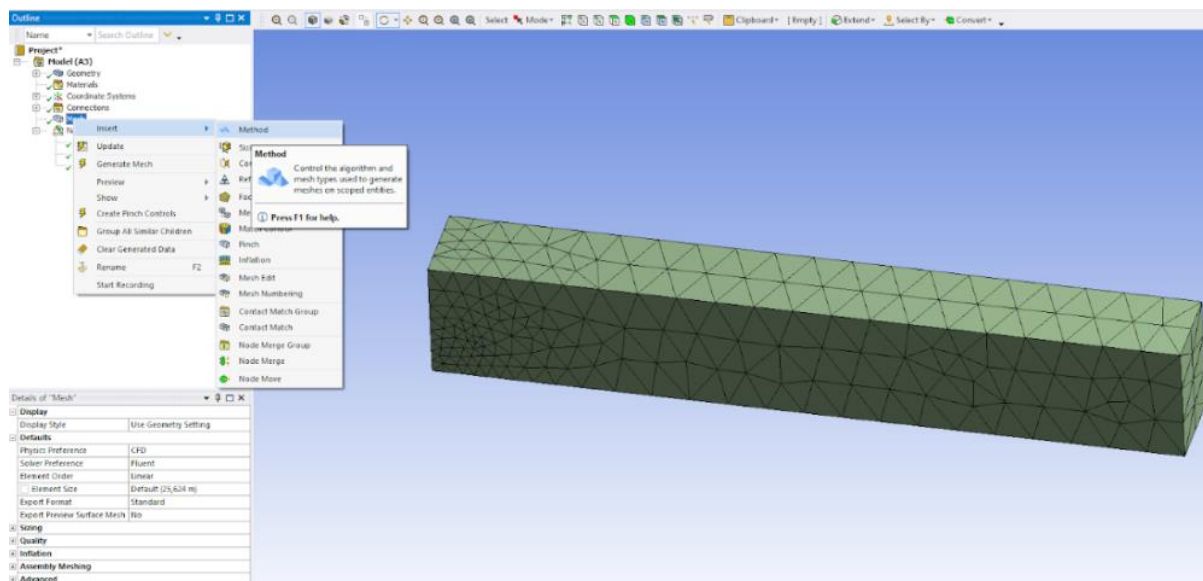


Рисунок 4.23- Определение метода сетки.

После выдается следующий результат на рисунке 4.24.

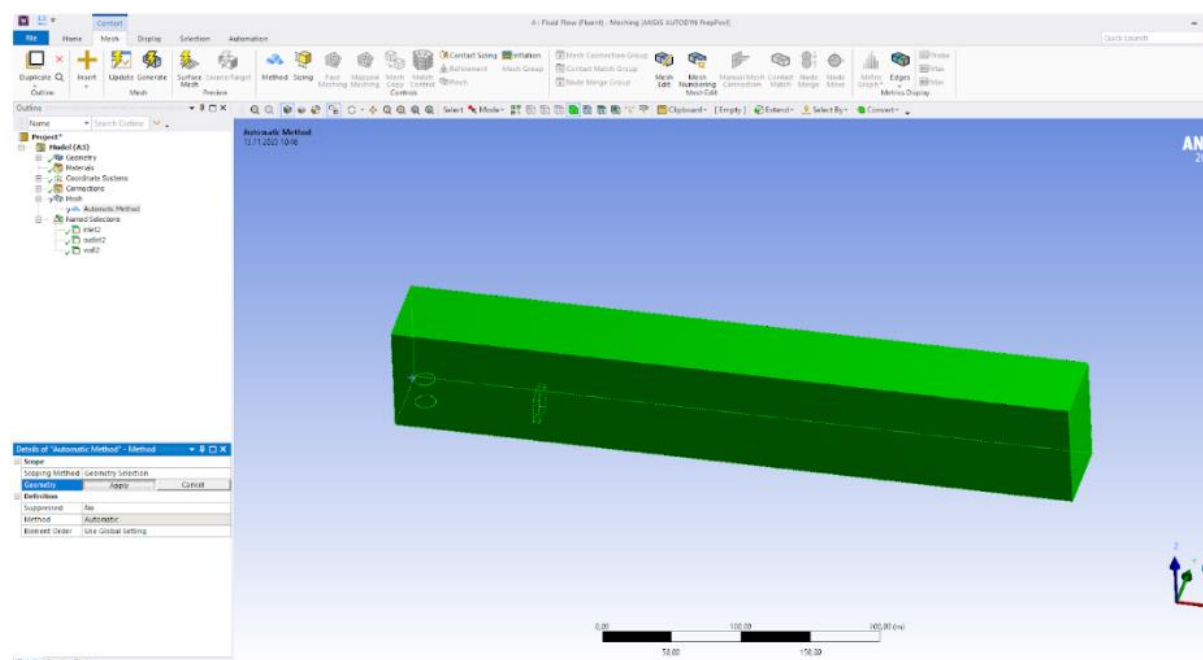


Рисунок 4.24 - Построенная модель «Mesh».

На рисунке 4.25. задается параметр - Sizing, элемент size - 4m, Scoping Method -Geometry Selection, Geometry - Apply.

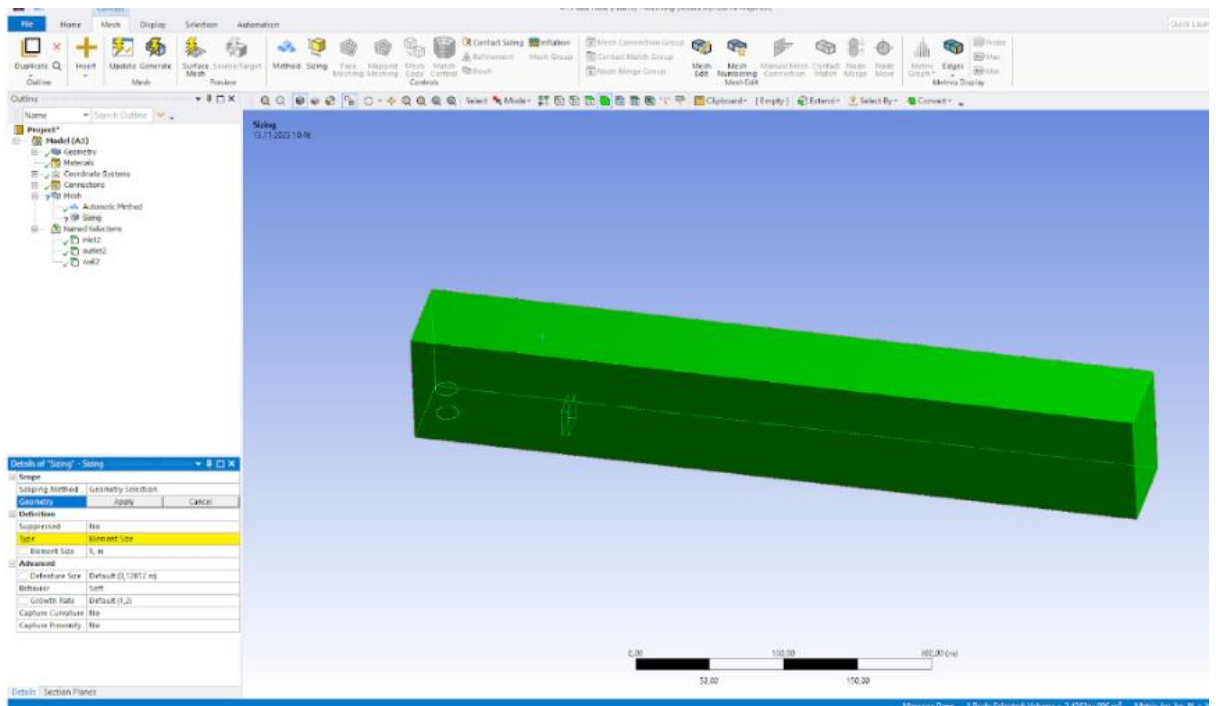


Рисунок 4.25 - Параметры модели «Mesh».

3.Задание граничных условий

В рабочей области нажимаем “Setup”, появляется окно для задания ограничений на рисунке 4.26:

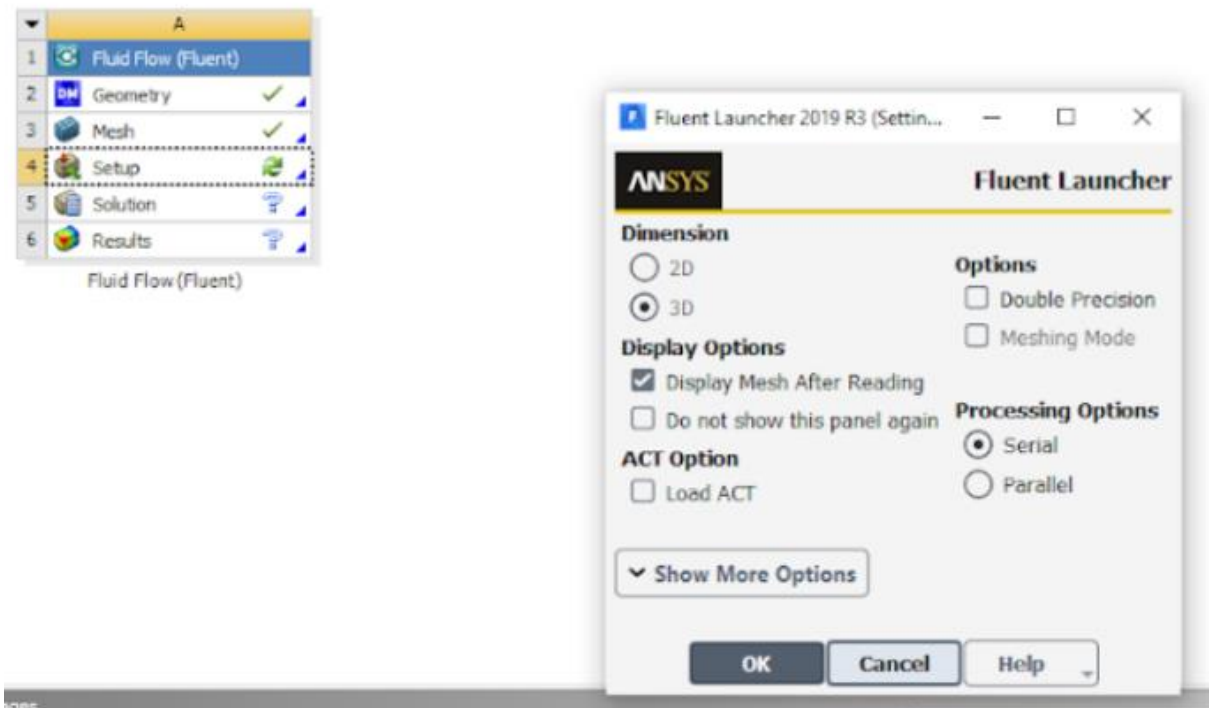


Рисунок 4.26 - Окно задания ограничений

Окно состоит из 2-х частей: в левой расположены условия - Setup, Solution, Results, Parameters & Customization на рисунке 4.27.

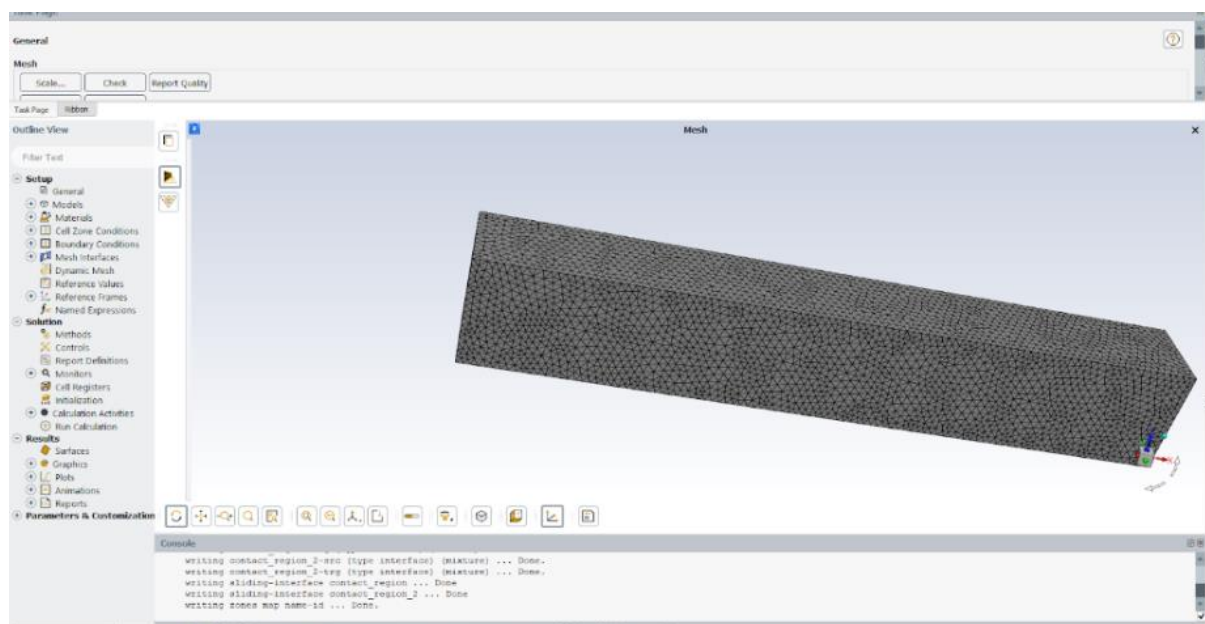


Рисунок 4.27- Окно параметров

На рисунке 4.28 задаются граничные условия

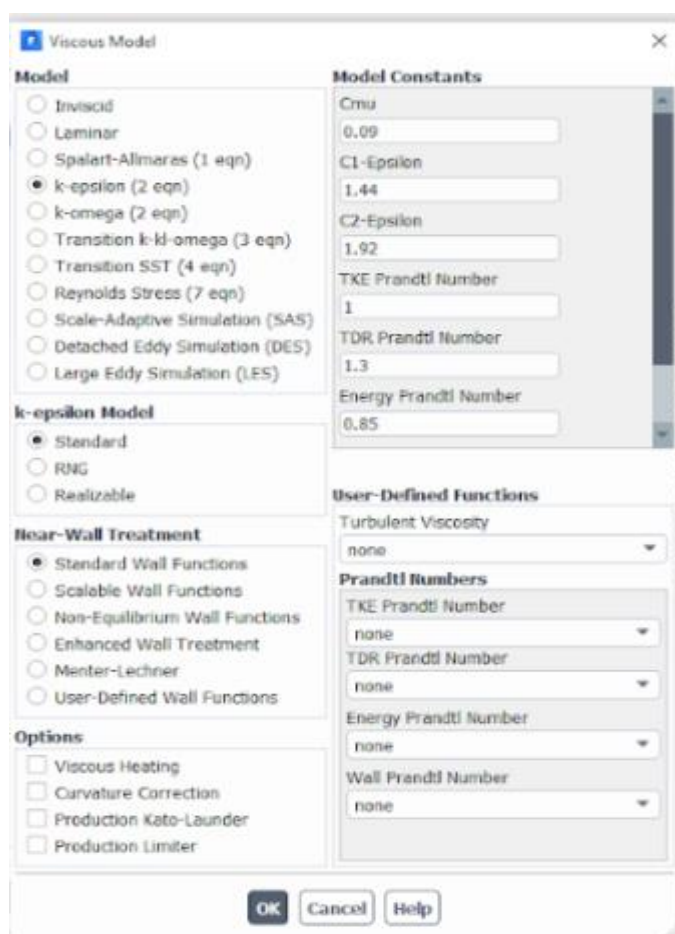


Рисунок 4.28 - Граничные условия

Для этого нужно перейти на вкладку Boundary Conditions (граничные условия) (Рисунок 4.28.), выбрать в списке граничных условий inlet1, проверить, что типом данного граничного условия является velocityinlet (вход потока с заданием его скорости), нажать кнопку Edit и в появившемся окне (Рисунок 4.29) и задать следующие параметры

Вкладка Momentum (количество движения):

Velocity Magnitude (величина скорости) 2 m/s

Turbulence (турбулентность):

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter

(метод задания интенсивность и гидравлический диаметр)

Turbulent Intensity (интенсивность турбулентности) 5 %

Hydraulic Diameter (гидравлический диаметр) 4 in

Вкладка Thermal (теплопередача):

Temperature (температура) 297

Определяем Scheme - Simplec

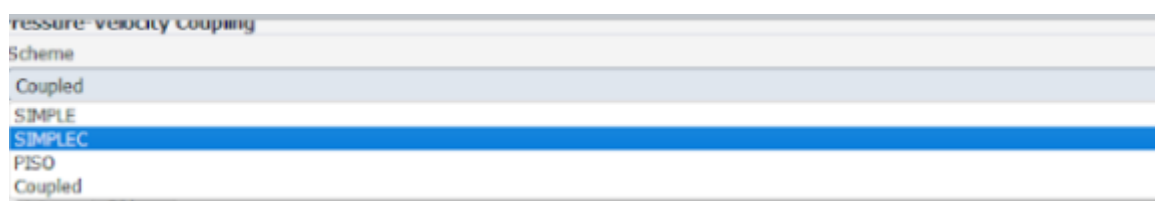


Рисунок 4.29 - Определение схема - Симплекс

Метод Инициализации - Hybrid Initialization

Для инициализации задачи переходим на вкладку Solution Initialization (инициализация решения) (Рисунок 4.30) на панели выбираем Hybrid Initialization (смешанный тип инициализации) и нажимаем кнопку Initialize. В ходе десяти итераций будут вычислены предварительные значения, и ими будет заполнена расчётная область. При этом в текстовом окне появится надпись «Hybrid initialization is done»

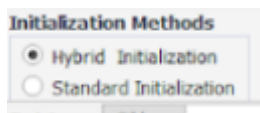


Рисунок 4.30 - Метод Инициализации

Аналогичным образом поочерёдно задать параметры всех граничных условий:

inlet2:

Type velocity-inlet

Momentum: Velocity Magnitude - 0.4 m/s

Turbulence:

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity 5 %

Hydraulic Diameter 0.8 in Thermal: Temperature 363 k outlet:

Type pressure-outlet (выход с заданием давления) Momentum: Gauge Pressure (статическое избыточное давление) 0 Turbulence: Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter Backflow Turbulent Intensity 5 % Backflow Hydraulic Diameter 4 in Thermal: Backflow Temperature 310 k symmetry: Type symmetry (симметрия)

Получаем следующий график после выполнения 200 итераций:

Для выполнения решения переходим на вкладку Run Calculation, вводим в поле Number of Iterations (количество итераций) некоторое количество итераций (например, 200) и нажимаем кнопку Calculate (вычислять). При этом начнётся процесс поиска решения, при котором в графическом окне отображается график невязок (Residuals) по количеству решаемых уравнений, а в текстовом окне выводится таблица изменения невязок от итерации к итерации. Рисунок 4.27. – Вкладка Run Calculation и процесс поиска решения. Когда будет завершено требуемое количество итераций или на какой-то итерации все невязки окажутся меньше установленного по умолчанию значения (0.001), решение считается сошедшим (Solution is converged) и расчет заканчивается с появлением окна сообщения (Рисунок 4.31).

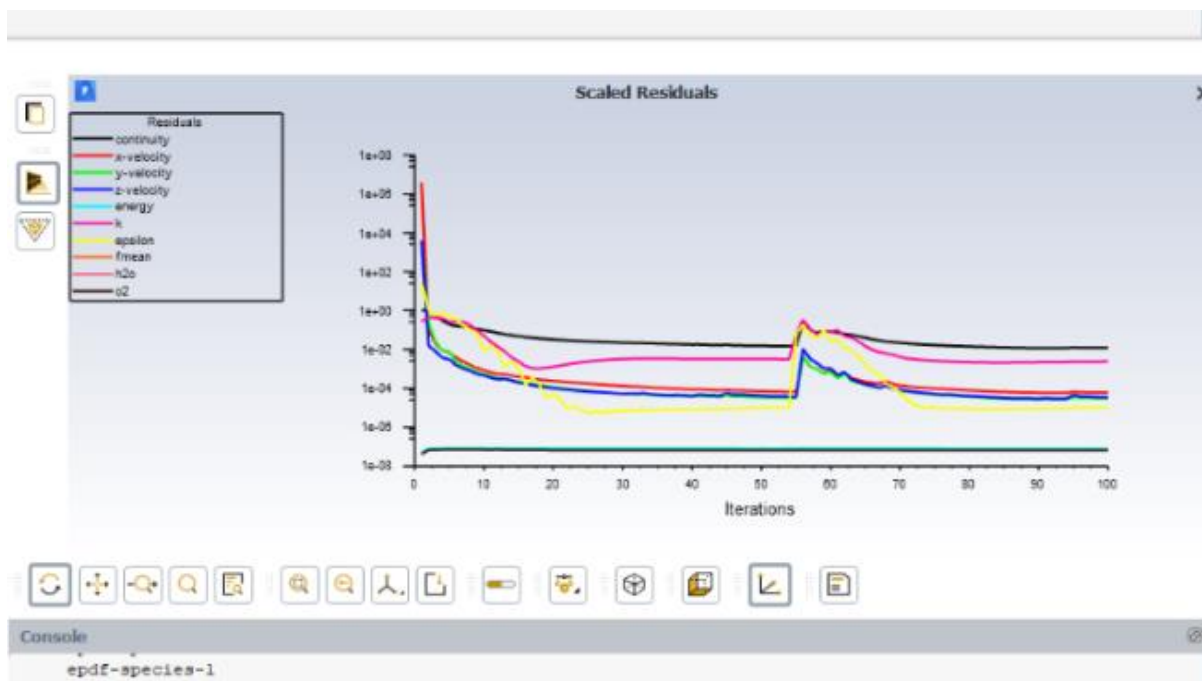


Рисунок 4.31 - Итерации

4.Поиск решения.

Для предварительного просмотра результатов на вкладке Graphics and Animations (графика и анимация) (Рисунок 4.27.) нужно дважды щелкнуть на элементе Contours (контуры), задать параметры визуализации и нажать Display: Contours of Pressure (давление) Options Filled (залитые цветом поля контуров) Surfaces symmetry (поверхности окрашивания – граница симметрии).

Для анализа результатов нужно открыть пост-процессор, дважды кликнув на элементе Results. При этом откроется окно постпроцессора с результатами обоих расчётов одновременно. Затем нужно вызвать из главного меню визуализатор «контур»: Insert, в появившемся окне оставить название Contour 1, нажав ОК, и установить следующие параметры (Рисунок 4.27.): Location (размещение) symmetry Variable (переменная) Static Temperature. Нажать Apply (применить). Повернув модели нужным образом (нажимая на тройку векторов справа внизу), можно получить картину, удобную для сравнения. Аналогично можно сравнить другие параметры (Velocity, Static Pressure и др).

В результате выполнения всех расчетов получаем следующие графики. На рисунке 4.32. показано “Статическое давление дыма на препятствия (здание)”

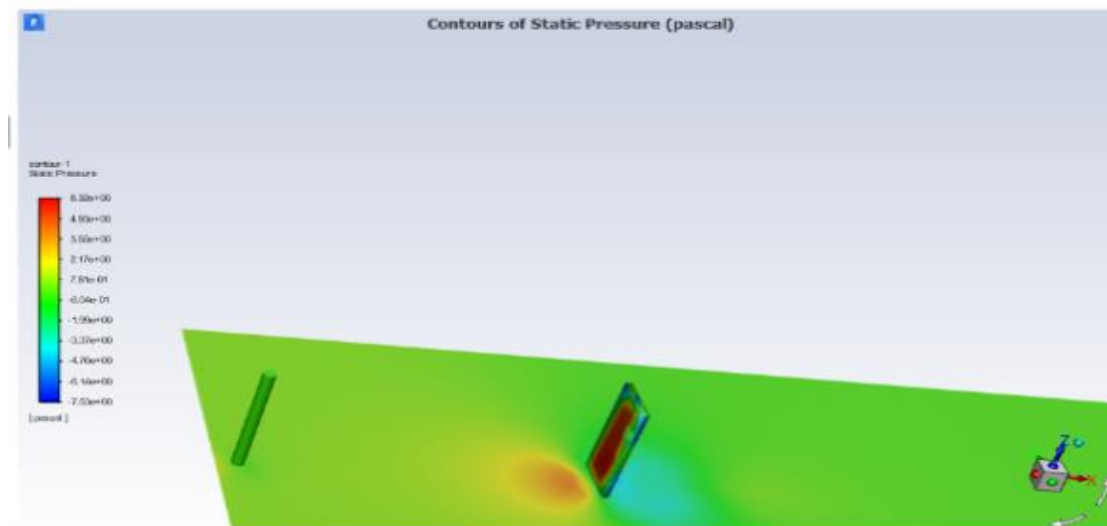


Рисунок 4.32 - Контуры давления

В результате выполнения всех расчетов получаем следующие графики. На рисунке 4.33. показано “Производная дыма на препятствия (здание)”

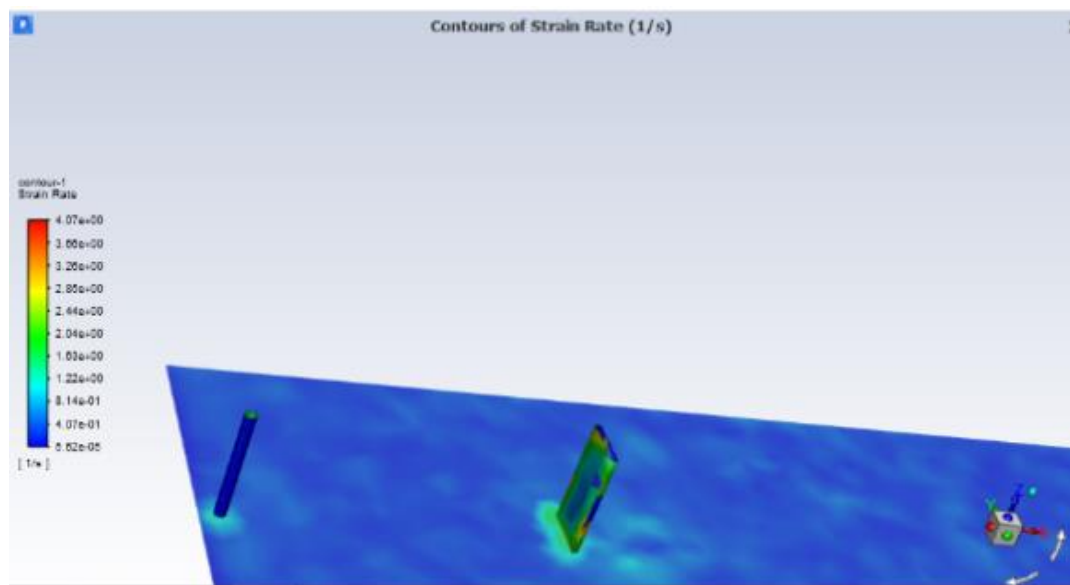


Рисунок 4.33 - Производная дыма на препятствия

На рисунке 4.34. показано “Статическая температура дыма на препятствия (здание) в виде гистограммы”.

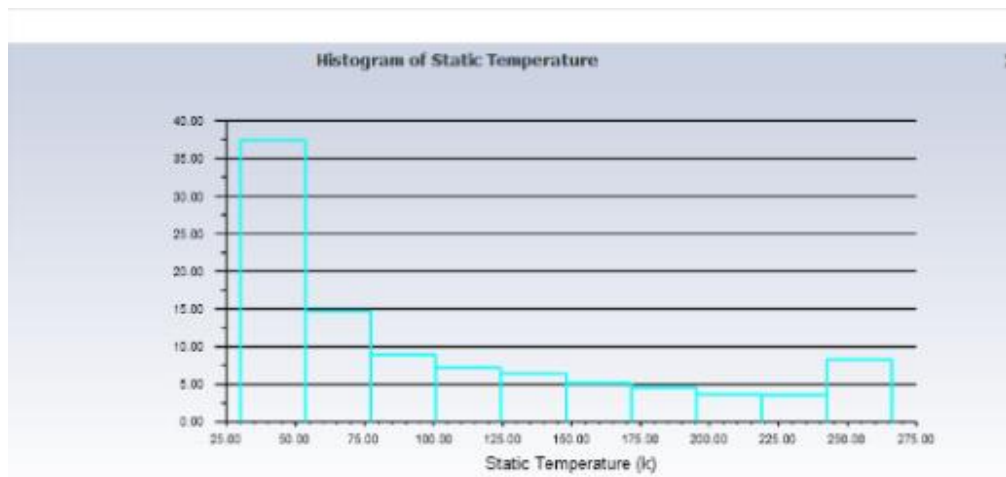


Рисунок 4.34 - Статическая температура дыма на препятствия

На рисунке 4.35. Показано “Статическая температура дыма на препятствия (здание)”

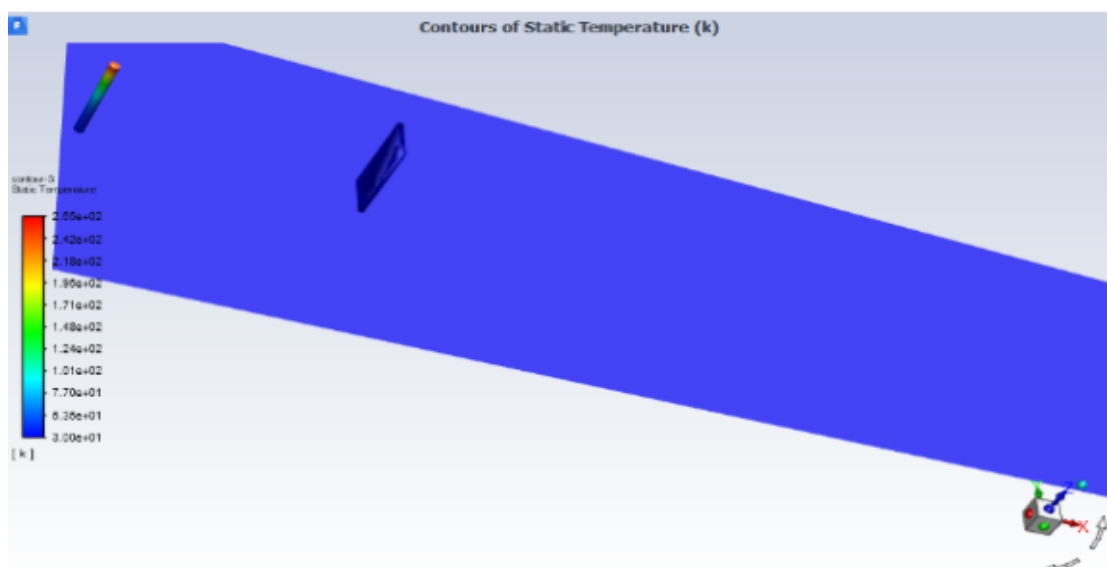


Рисунок 4.35 - Статическая температура дыма

На рисунке 4.36. показано “Турбулентная кинетическая энергия дыма на преграду (здание)”

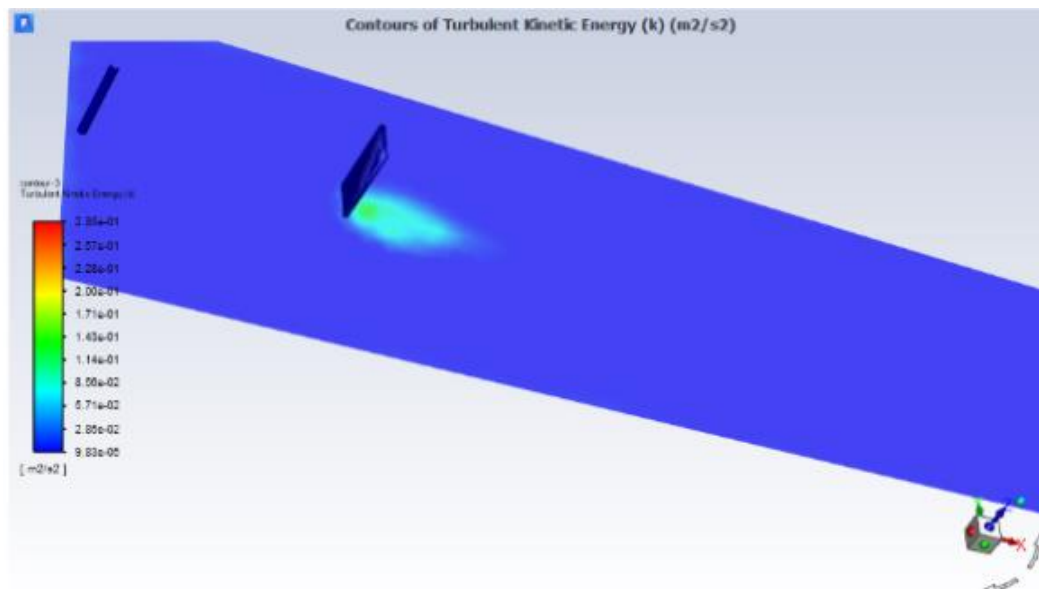


Рисунок 4.36 - Турбулентная кинетическая энергия

На рисунке 4.37. показано “Вектор скорости по величине дыма на преграду (здание)”

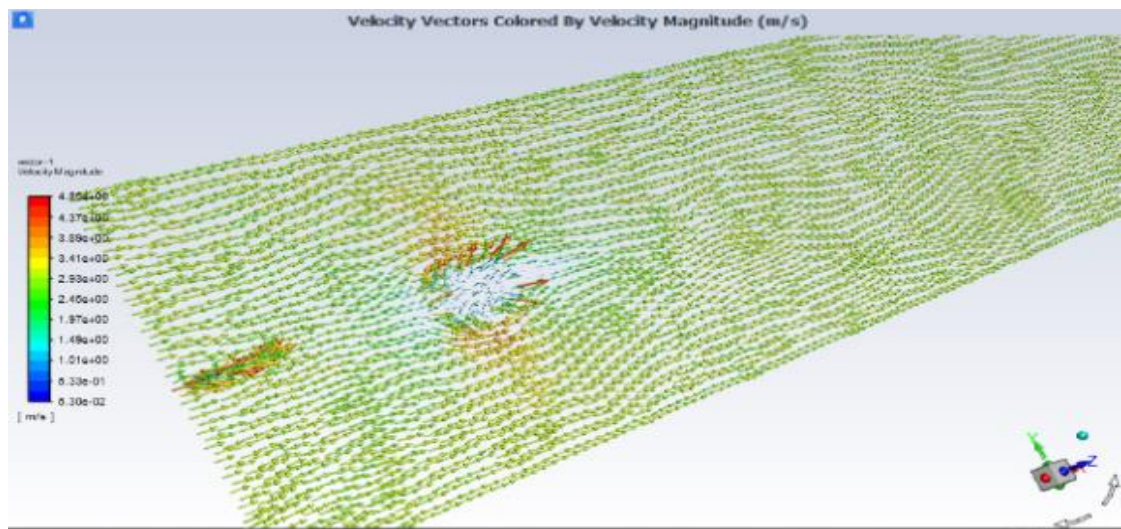


Рисунок 4.37- Вектор скорости по величине дыма

На рисунке 4.38. показано “Статическая температура” в виде графика

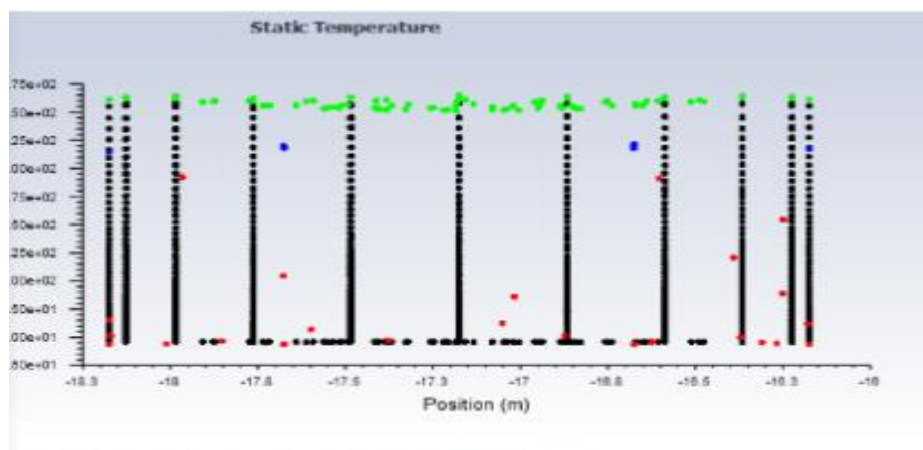


Рисунок 4.38 - Статическая температура

На рисунке 4.39. показано «Турбулентная кинетическая энергия» в виде графика

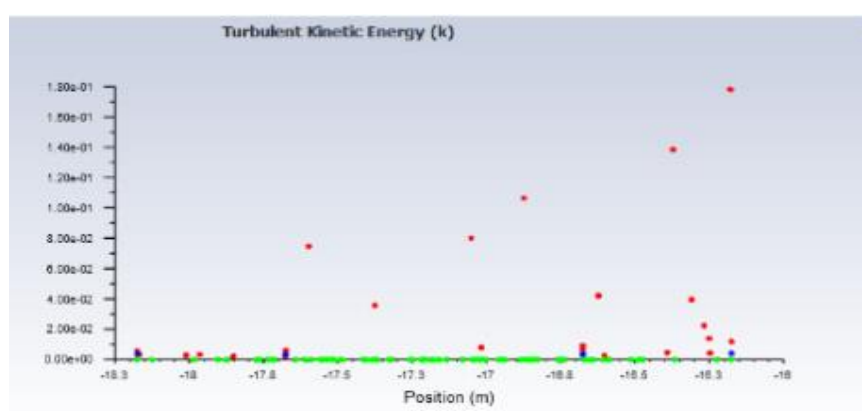


Рисунок 4.39 - Турбулентная кинетическая энергия

5. Результаты расчетов

Произвести инициализацию (Solution Initialization Initialize) и выполнить расчёт (Run Calculation Calculate) и получен результат на рисунке. 4.40.

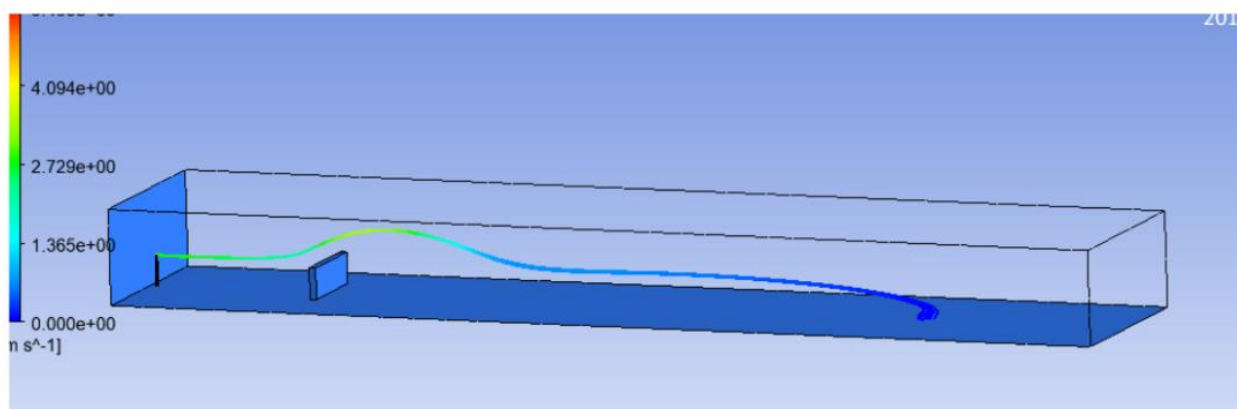


Рисунок 4.40 - Результаты расчетов

4.4. Выводы по главе

Рассмотрено математическое моделирование процессов диффузии загрязняющих веществ из точечного источника в атмосфере: подбор значений параметров в модели; разбиение области на ячейки и решение конечно-разностных уравнений. Получены результаты в трехмерном моделировании зависящие от скорости и направления ветра, температуры выбросов и стабильности атмосферы, построенная на основе расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent, ANSYS CFX.

ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ И ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ

5.1. Численное моделирование переноса пассивной примеси над ограниченной территорией

В данном разделе приведены результаты расчета переноса осредненной по высоте пассивной примеси над термически и орографически неоднородной ограниченной территорией, включающей территорию Кыргызской Республики, с использованием двумерной модели, полученной путем интегрирования по высоте полных уравнений гидротермодинамики.

Проблема взаимодействия человека с окружающей средой представляет в настоящее время активно развивающуюся область применения методов математического моделирования. Особенно остро эти задачи ставятся в последние годы в связи с активным влиянием человека на окружающую среду. Увеличение масштабов хозяйственной деятельности связано с воздействием на окружающую среду локального и глобального характера. При оценке возможных последствий этой деятельности существенную роль должны сыграть математические модели. С позиций математического моделирования влияние деятельности человека можно интерпретировать как реализацию некоторых экспериментов. Постановка же экспериментов в реальных условиях на практике, с одной стороны, оказывается слишком дорогостоящей с другой стороны, многие эксперименты в экологии и социально – экономических областях могут привести к необратимым последствиям.

К настоящему времени уже накоплен достаточно большой опыт в решении задач физики атмосферы и прикладной метеорологии с помощью математических моделей и анализа фактической информации [35, 48, 59, 60, 75]. В зависимости от исследования конкретной проблемы выбираются модели различного уровня по физическому содержанию для эффективной реализации их на вычислительных машинах. Теоретическую основу моделей данного класса

составляют уравнения гидротермодинамики атмосферы и уравнения переноса и трансформации примесей.

Математическая модель гидротермодинамики атмосферных процессов на ограниченной территории регионального масштаба. Для записи уравнений используем декартову систему координат x, y, z (ось x ориентирована на восток, y – на юг, z – вертикаль вниз).

В качестве исходных уравнений локальных атмосферных процессов примем: уравнения движения (5.1), уравнения неразрывности (5.2), уравнение переноса тепла и примеси (5.3), уравнение состояния (Клайперона) (5.4) в следующем виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) + fv &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F^u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F^v, \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= g\rho,\end{aligned}\tag{5.1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,\tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \theta}{\partial t} + L(\theta) &= F^\theta, \\ \frac{\partial c}{\partial t} + L(c) + \frac{\partial w'c}{\partial z} + qc &= F^c,\end{aligned}\tag{5.3}$$

$$p = \rho RT,\tag{5.4}$$

Задаем краевые условия при $z=0$ и $z=H$ в виде:

$$z = 0: \quad \rho_0 A_v \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau_x, \quad \rho_0 A_v \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau_y, \quad w = 0, \quad w' = 0,\tag{5.5}$$

$$z = H: \quad u = v = w = 0, \quad A_\theta^z \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad A_c^z \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad w' = 0$$

и начальные условия при $t = 0$ в виде:

$$t = 0: \quad u = u_0, \quad v = v_0, \quad \theta = \theta_0, \quad c = c_0. \quad (5.6)$$

Здесь u, v, w – проекции вектора скорости ветра на оси координат x, y, z соответственно; ρ – плотность; p – давление; T – температура; R – газовая постоянная; f – параметр Кориолиса, $\theta = T(p_0/p)^{(\kappa-1)/\kappa}$ – потенциальная температура; $\kappa = c_p/c_v$, c_p, c_v – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении и объеме соответственно; c – концентрация примеси; q – постоянная распада; w' – средневзвешенная скорость падения примеси; $H=H(x, y)$ – функция, описывающая рельеф подстилающей поверхности; τ_x, τ_y – касательное напряжение трения ветра на верхней границе ($z=0$); n – направление внешней нормали к подстилающей поверхности $H(x, y)$; $L_{(\mu)} = \frac{\partial u \mu}{\partial x} + \frac{\partial v \mu}{\partial y} + \frac{\partial w \mu}{\partial z}$ – оператор адвекции скалярной величины μ ; F^μ – члены, описывающие вертикальную и горизонтальную турбулентность, имеющие вид $F_\mu = \frac{\partial}{\partial z} A_\mu^z \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A_\mu^x \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_\mu^y \frac{\partial \mu}{\partial y}$; $A_\mu^z, A_\mu^x, A_\mu^y$ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентности, где под μ понимаются u, v, θ или c ; ρ_0 – средняя плотность воздуха. Краевые условия на «открытой» границе области сформулируем ниже.

Перейдем от метеорологических величин p, ρ, θ и T к их отклонениям p', ρ', θ' и T' по формулам:

$$p = \bar{p} + p', \quad \rho = \bar{\rho} + \rho', \quad \theta = \bar{\theta} + \theta', \quad T = \bar{T} + T', \quad (5.7)$$

где $\bar{p}(z), \bar{\rho}(z), \bar{\theta}(z), \bar{T}(z)$ – функция только высоты, $\theta = \text{const}$, причем

$$\bar{p} = R\bar{\rho}\bar{T} \quad \text{и} \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = g\bar{\rho}. \quad \text{Предполагая далее} \quad \frac{p'}{\bar{p}} \ll 1, \quad \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \ll 1 \quad \text{и} \quad \frac{\theta'}{\bar{\theta}} \ll 1 \quad \text{и}$$

интегрируя исходные уравнения по z от 0 до H с учетом того, что $\frac{\partial}{\partial z} \frac{p'}{\bar{p}} = \lambda \theta'$, где

$\lambda = g/\bar{\theta} = \text{const}$ приходим к уравнению для интегральной функции тока ψ

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial t} + R \right] A\psi + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A\psi}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A\psi}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \\ & = A_H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} \right) \right] + F, \end{aligned} \quad (5.8)$$

здесь

$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_y}{\rho_0 H} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_x}{\rho_0 H} \right) - \frac{\lambda H^2}{2} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \tilde{\theta}'}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \tilde{\theta}'}{\partial x} \right) \right], \\ A\psi &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right), \quad A_H = A_u^x = A_u^y = A_v^x = A_v^y = \text{const}, \end{aligned}$$

а функция тока ψ связана с горизонтальными скоростями соотношениями

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \int_0^H v dz, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = - \int_0^H u dz. \quad (5.9)$$

При выводе уравнения (5.8) при линеаризации нелинейных членов предполагалось, что

$$\int_0^H \alpha(z) \beta(z) dz = \tilde{\alpha} \int_0^H \beta(z) dz = \tilde{\alpha} \tilde{\beta} H, \quad (5.10)$$

где α и β – это u или v , а волна сверху означает осреднение по глубине, т.е.

$(\sim) = \frac{1}{H} \int_0^H (\sim) dz$. Считалось, что составляющие трения τ_x^b , τ_y^b о подстилающую

поверхность пропорциональны составляющим полного потока, т.е.

$$\begin{aligned} -\frac{\tau_x^b}{\rho_0} &= A'_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_H = -R \int_0^H u dz = R \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ -\frac{\tau_y^b}{\rho_0} &= A'_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_H = -R \int_0^H v dz = -R \frac{\partial \psi}{\partial x}, \end{aligned} \quad (5.11)$$

где $A'_v = A_v + A_H \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right]$ – эффективный коэффициент

придонного трения.

Уравнение (5.11) можно записать в виде системы двух уравнений относительно функции тока ψ и потенциального вихря $\xi = (A\psi - f)/H$

$$\begin{aligned} H \left[\frac{\partial}{\partial t} + R \right] \xi + J(\psi, \xi) &= -Rf + F + A_H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} \right) \right], \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) &= H\xi + f, \end{aligned} \quad (5.12)$$

где $J(\psi, \xi) = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x}$, $\Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа

(как и в (5.8)).

Осредненные по глубине отклонение потенциальной температуры ($\tilde{\theta}'$) и концентрация примеси ($\tilde{c}$) определяются из уравнений

$$\begin{aligned}\frac{\partial H\tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}H\tilde{\theta}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}H\tilde{\theta}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} HA_{\theta}^x \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} HA_{\theta}^y \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y}, \\ \frac{\partial H\tilde{c}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}H\tilde{c}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}H\tilde{c}}{\partial y} + qH\tilde{c} &= \frac{\partial}{\partial x} HA_c^x \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} HA_c^y \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y}.\end{aligned}\tag{5.13}$$

На открытых участках границы принимается условие равенства нулю нормальной производной от касательной составляющей скорости. Там, где поток направлен из рассматриваемой области, функция тока и потенциальный вихрь вычисляются с помощью системы (5.12), а потенциальная температура и концентрация примеси из уравнений (5.13) при условии равенства нулю их нормальных производных. Там, где поток направлен в рассматриваемую область, потенциальная температура, концентрация примеси и функция тока заданы, а потенциальный вихрь находится из второго уравнения системы (5.12).

При численном решении уравнений (5.12) и (5.13) используются консервативно – диссипативные разностные схемы по пространственным переменным и неявные аппроксимации по времени. Функция тока (ψ) и потенциальный вихрь (ξ) определяются в узлах горизонтальной разностной сетки с целочисленными значениями индексов i и j по осям x и y соответственно, отклонение потенциальной температуры ($\tilde{\theta}'$) – в точках с полуцелыми значениями индексов $i+1/2, j+1/2$, составляющие скорости ($\tilde{u}'$) и ($\tilde{v}'$) в точках $i, j+1/2, i+1/2, j$ соответственно (сетка D по терминологии [4]). Системы алгебраических уравнений, аппроксимирующие исходные дифференциальные уравнения, решаются методом последовательной верхней релаксации.

При проведении численных экспериментов в начальный момент времени задавалось распределение ($\tilde{\theta}'_0$) с меридиональным градиентом в 10°C [$\tilde{\theta}' = 10^0 \frac{y}{l_y} - \gamma [H_0 - H(x, y)]$, $\gamma = 0,936 \cdot 10^{-3}$ град / м, $H_0 = 8500$ м – высота, на которой расположено начало системы координат ($z=0$); l_y – размер области с севера на юг, $l_y = 4,8 \cdot 10^5$ м], задавался фоновый поток $u=u_0$, $v_0=v_0$ для горизонтальных

составляющих скорости в зависимости от рассматриваемого варианта. Значение интегральной функции тока в начальный момент находилось с использованием соотношений (3.9), а значение потенциального вихря ξ – из соотношения

$$\xi = (A\psi - f) / H = \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{v}{H} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{u}{H} \right) / H \quad (5.14)$$

т.е. из второго уравнения системы (5.12).

В обсуждаемых ниже численных экспериментах, выполненных с 20-ти километровым разрешением по горизонтальным координатам (49x25 точек по оси x и y соответственно), значения основных параметров следующие:

$$\begin{aligned} F &= 9,75 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-13} \text{ y (c}^{-1}\text{)}, R = 10^{-6} \text{ c}^{-1}, \\ A_H &= 2M^2/2, A_\theta^x = A_c^x = \frac{1}{2} A_H + h|\tilde{u}|/2, \\ A_\theta^y &= A_c^y = \frac{1}{2} A_H + h|\tilde{v}|/2, \quad \tau_x = \tau_y = 0, \\ q &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}, \tau = 120 \text{ c}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

здесь h – шаг по горизонтальным координатам, τ – шаг по времени.

В начальный момент времени в точке с координатами (x_0, y_0) , принадлежащей рассматриваемой области, задавалось наличие концентрации примеси, после чего рассчитывался ее перенос, с помощью решения второго уравнения (5.13) горизонтальным ветром, компоненты которого находились из решения уравнения (5.12) с учетом влияния термической неоднородности $(\tilde{\theta}')$ определяемой из решения первого уравнения (5.13).

Всего было проведено три численных эксперимента по моделированию процесса распространения примеси над территорией Кыргызской Республики с различными метеорологическими условиями. Интегрирование уравнения

диффузии примеси во всех экспериментах проводилось на 30 и более суток модельного времени с шагом 1 сутки. Использовался реальный рельеф поверхности, изолинии которого приведены на рисунке 5.1. Нижний левый угол расчетной области соответствует 39' с.ш. и 69' в.д.

В первом эксперименте в качестве начального состояния был задан западный перенос со скоростями $u_0=1\text{ м/сек}$ и $v_0=0,1\text{ м/сек}$. Далее рассчитывались термодинамические характеристики по описанной выше модели. Полученное в результате моделирования поле ветра представлено изолиниями функции тока на рисунке.5.2. Из рисунка видно, что существенное влияние на динамику оказывает топография поверхности. Затем в районе Каджи-Сайского хвостохранилища было задано начальное значение концентрации примеси, и уравнение диффузии примеси было проинтегрировано на 30 суток, т.е. моделировался процесс распространения примеси в результате аварийной ситуации. Изолинии концентрации примеси приведены на рисунке 5.2. Анализ результатов расчета показал, что распространение примеси осуществляется в соответствии с присущей этому району циркуляцией.

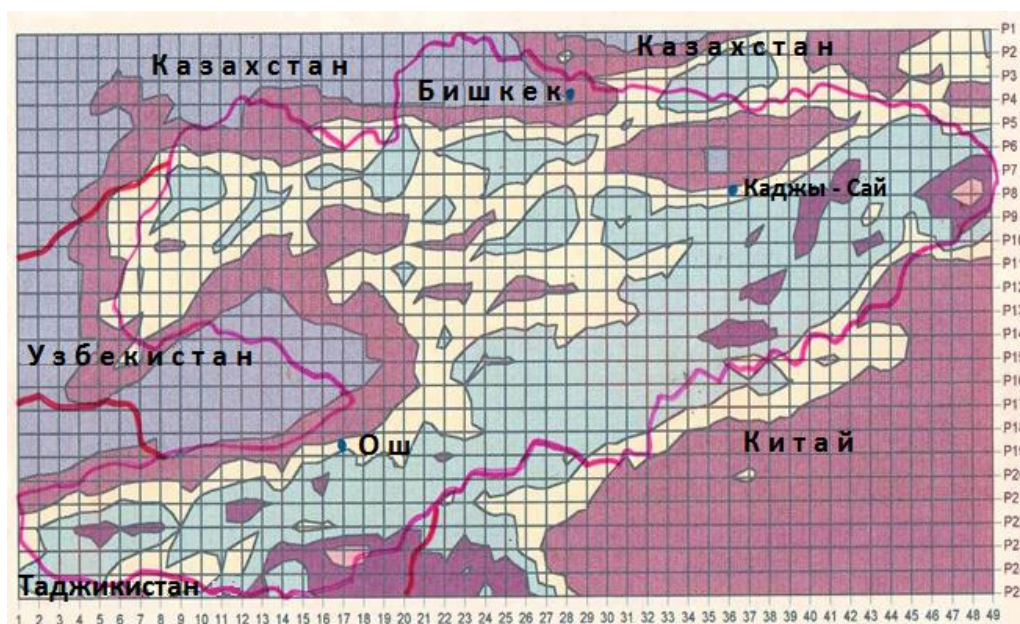


Рисунок 5.1 - Изолинии рельефа поверхности

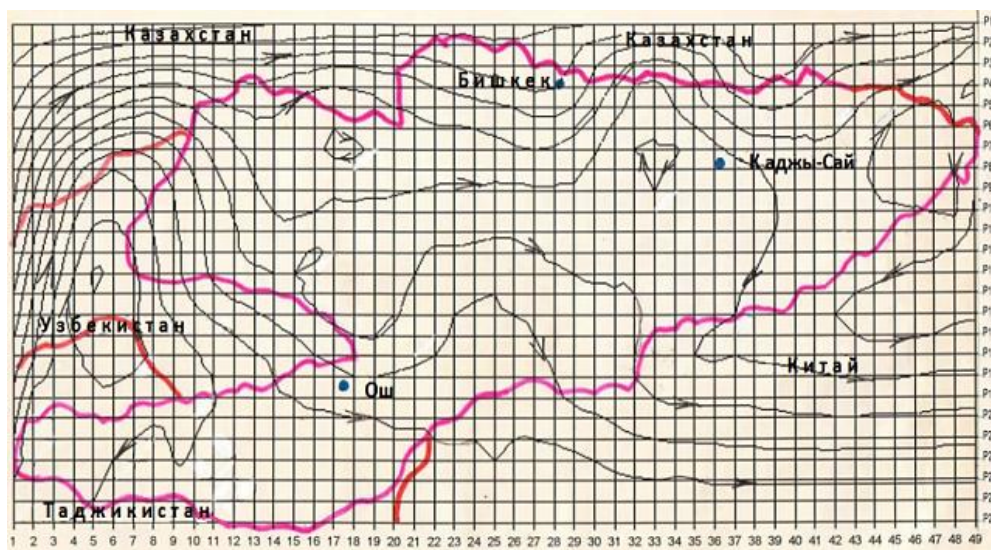


Рисунок 5.2 - Изолинии функции тока (эксп.1)

Во втором численном эксперименте задавался западный перенос со скоростями $u_0=10\text{м/сек}$, $v_0=1\text{м/сек}$. В этом случае влияние рельефа поверхности на динамику потока значительно меньше и преобладает заданная циркуляция (Рисунок 5.4). Облако загрязнения имеет более вытянутую форму в восточном направлении (Рисунок 5.5). После 40 суток интегрирования облако загрязняющих веществ выходит за пределы расчетной области через восточную границу.



Рисунок 5.3 - Изолинии концентрации примеси (эксп.2)

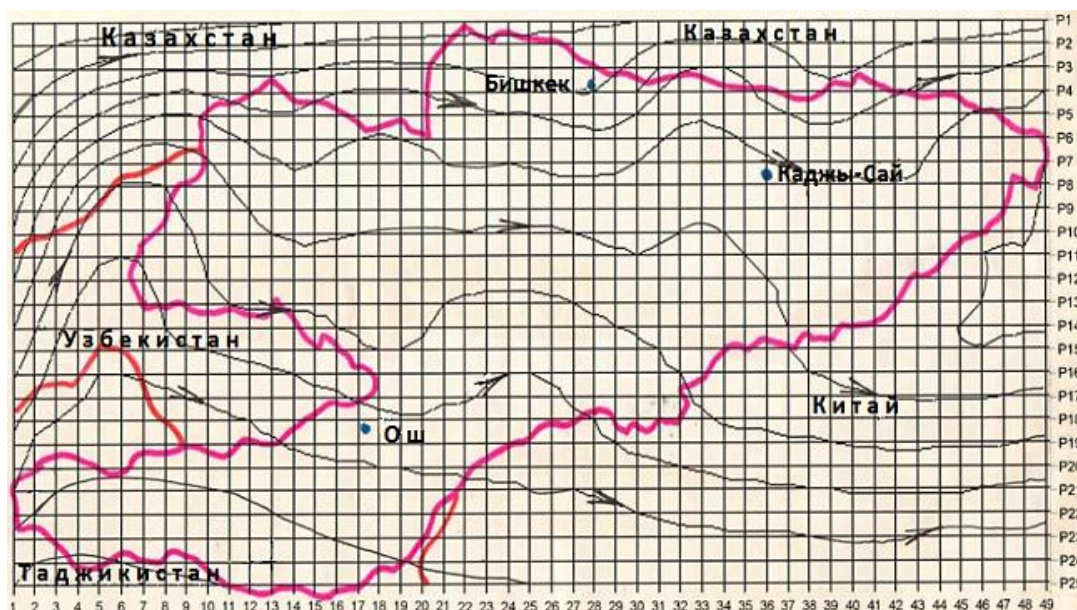


Рисунок 5.4 - Изолинии функции тока (эксп.2)

Основные отличия третьего эксперимента от первых двух заключаются в том, что был задан восточный перенос ($u_0=5$ м/сек, $v_0=0,5$ м/сек), а концентрация примеси задавалась на восточной границе расчетной области. Этот численный эксперимент моделирует процесс распространения радиоактивного облака, перемещающегося с территории Китая. Динамика облака приведена на рисунках 5.6-5.8 через 10, 25 и 35 суток интегрирования.

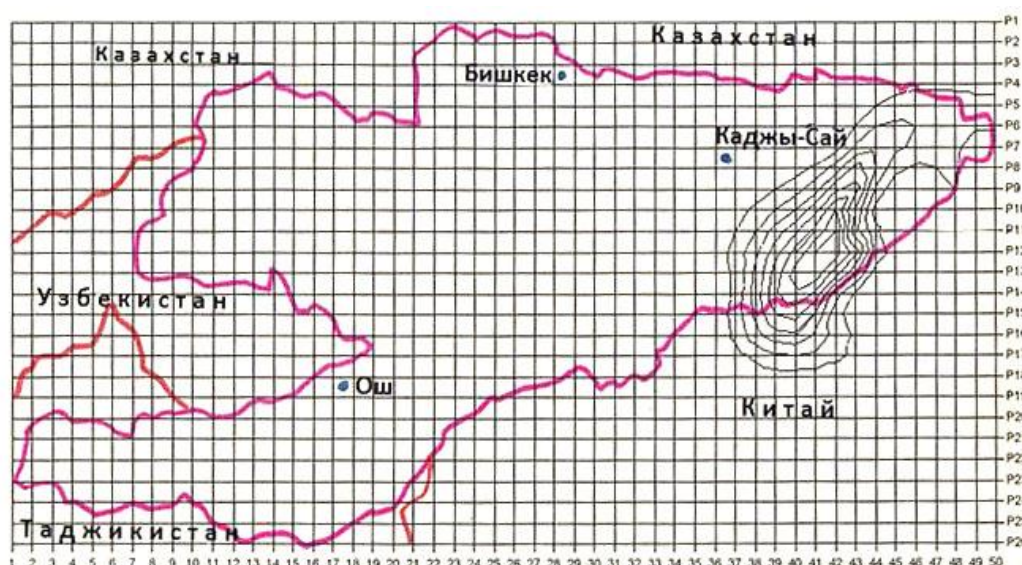


Рисунок 5.5 - Изолинии концентрации примеси (эксп.2)

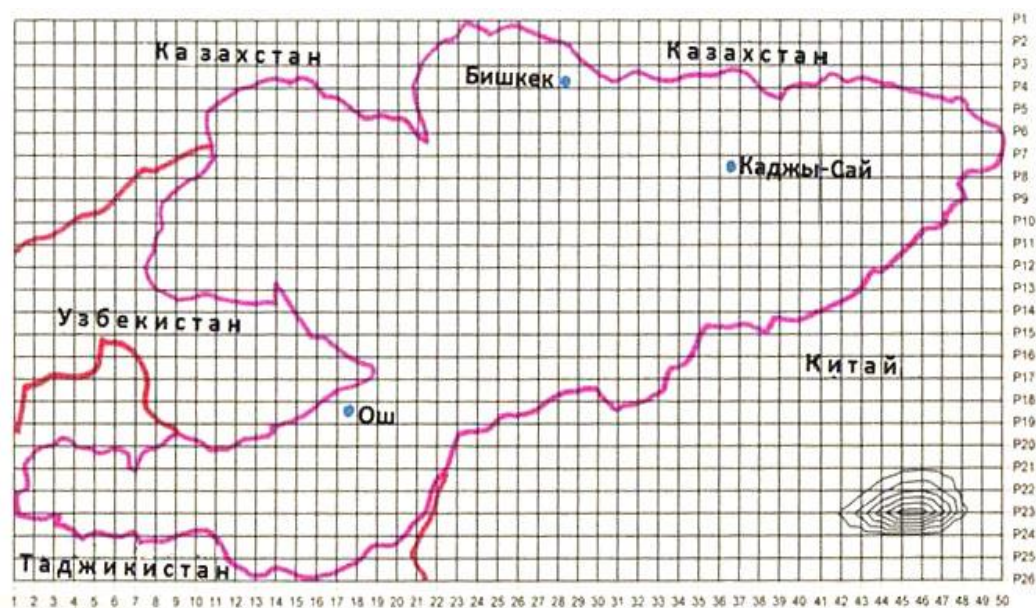


Рисунок 5.6 - Изолинии концентрации (эксп.3)

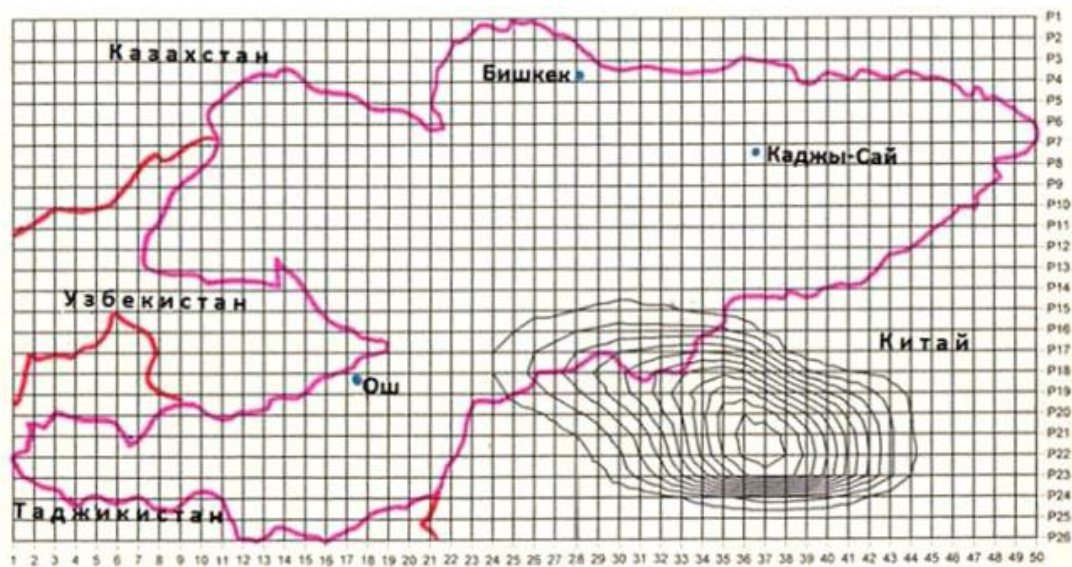


Рисунок 5.7 - Изолинии функции тока – 25суток (эксп.3)

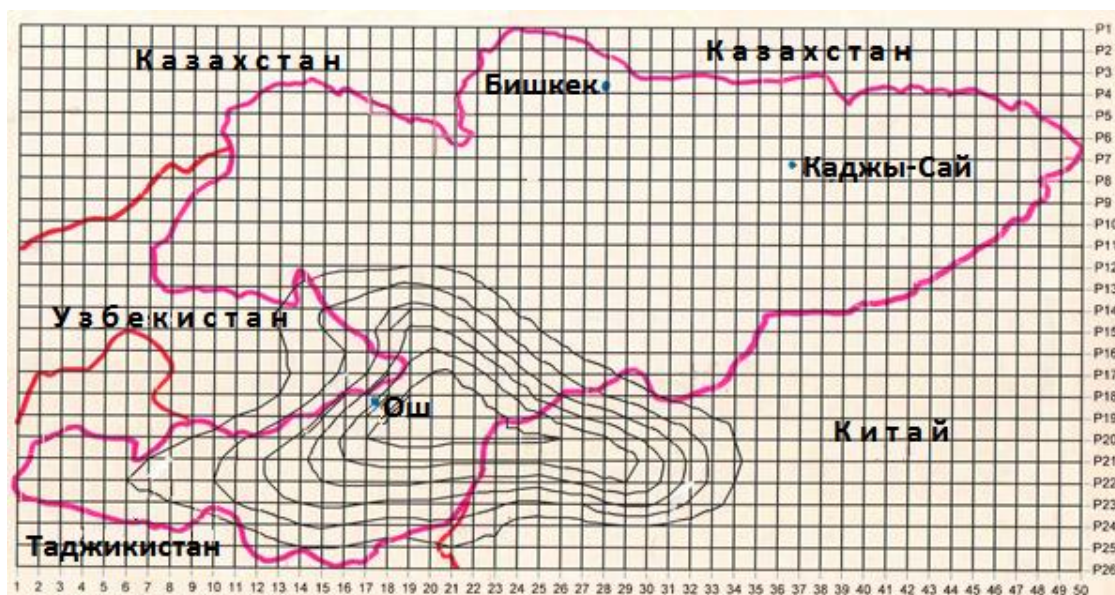


Рисунок 5.8 - Изолинии функции тока- 35 суток (эксп.3)

Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют реалистичность моделирования процесса распространения примеси. Выводы. Загрязнение атмосферы примесями различного происхождения вызывает научный интерес, прежде всего тем, что большая часть атмосферных примесей оказывает вредное влияние как на животный и растительный мир, так и на здоровье человека.

Концентрация примесей, в том числе и радиоактивных, в атмосфере и на земной поверхности в сильной степени зависит от метеорологических факторов, что подтверждается и выполненными численными экспериментами даже в рамках математической модели.

Среди упомянутых факторов важное значение имеют скорость и направление ветра, их изменчивость с высотой, термическая устойчивость атмосферы, облака, туманы и осадки, рельеф местности и т. п. Под влиянием этих факторов концентрация примесей в атмосфере изменяется в широких пределах. В связи с этим представляется важным разработка трехмерных численных моделей переноса и трансформации примесей для оценки выбора мест для строительства промышленных предприятий, жилищ и т.д.

5.2. Моделирование процесса тепловлагодпереноса в неоднородной пористой среде с учетом разрыва пористости.

Применим выписанные выше уравнения и условия к нескольким типичным задачам нестационарной одномерной фильтрации. В качестве начальных условия при $t = 0$ в задаче А (рисунке 5.9,а) и Б (рисунке 5.9,б) зададим покаящийся над ГР слоя жидкости толщины $h(0) \leq h_0=1$. Пусть, кроме того, в тот же момент $z_+(0)az_{+0} = 0$, и в задаче А(Б) под ГР располагается ЗСМ (ЗЧН). При $t>0$ начнется процесс фильтрации, причем согласно (5.4)

$$z'_+ = n^j w_+ \quad (5.16)$$

с $j = j_a = 1$ в первой задаче и $j = j_\delta = 0$ во второй.

В силу (5.16) и w_- , т. е. z -компонента скорости фильтрующей жидкости под и над ГР, - функции только t . Поэтому обозначив $\partial w / \partial t$ через w' и проинтегрировав уравнение (5.16) от $z=0$, где согласно определению из (3.20) $\aleph(0, t) = p^+(t) = p^+$, до ФН, где $z=z_+$, а в силу (5.16) $\aleph(z_+) = -z_+$, найдем, что в обеих задачах:

$$\left(\frac{w_+}{\delta} + \varepsilon w'_+ - 1 \right) z_+ = p^+ \quad (5.17)$$

Здесь, по аналогии с δ из (5.6) множитель ξ введен для того, чтобы была видна роль обычно пренебрегаемого инерционного слагаемого уравнения движения (5.17): при $\xi=1$ оно учитывается, а при $\xi=0$ - нет.

Система уравнений (5.16) и (5.17) незамкнута, поскольку она содержит еще неизвестное давление p^+ . Для его определения сначала, как и при получении (5.11), проинтегрируем уравнение движения (5.13) с $1/\aleph=0$ через слой жидкости над ГР, учтя, что $w^- = w_-$ функция только t , равная согласно (5.12) $mnw^+ = mnw_+$, и что в силу (5.13) $\aleph(h)=h$. В результате получим:

$$p^- = (1 - \varepsilon w'_+) h = (1 - \varepsilon mnw'_+) h$$

откуда в соответствии с (5.11) найдем требуемое выражение для p^+ . Вот оно

$$p^+ = (1 - \varepsilon mn w'_+) h + \frac{\delta(m^2 n^2 - 1)(w_+)^2}{2} \quad (5.18)$$

При написании данной формулы, как и ранее, учтена тождественность w^+ и w_+ , которая очевидна, так как w при $z > 0$ (и аналогично при $z < 0$) - функция только t . Если в (5.16) положить $\xi = \delta = 0$, то это даст равенство $p^+ = h$, чаще всего употребляемое в классической теории фильтрации. После подстановки p^+ из (5.17) в (5.18) придем к уравнению:

$$\varepsilon(mnh + z_+)w'_+ = h + z_+ - \left(\frac{z_+}{\lambda}\right) - \left(\frac{\delta(m^2 n^2 - 1)}{2}\right)w_+ \quad (5.19)$$

Наконец, для определения входящей в (5.19) функции $h=h(t)$ имеются очевидные уравнение и начальное условие

$$h' = -w_- = mnw_+, h(0) = h_0 = 1 \quad (5.20)$$

Интегрирование уравнений (5.15), (5.18) и (5.19) требует задания еще одного начального условия для $w_+(0)$. В задачах А и Б оно имеет вид:

$$w_{+0} = w_+(0) = \frac{w_-(0)}{(mn)} = 0 \quad (5.20)$$

и замыкает формулировку задачи Коши для получившейся системы трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Ее решение определяет развитие нестационарного процесса, фильтрации для всех $t > 0$. С другой стороны, для выяснения характера решения при малых t можно поступить следующим образом. Будем искать w в виде:

$$w'_+ = \alpha + \beta t^\gamma + \dots \quad (5.21)$$

с заранее неизвестными константами α , β и γ , причем в соответствии с (5.20) $\gamma > -1$. Проинтегрировав (5.21) и (5.19) и учтя начальные условия обеих задач: $w_{+0} = z_{+0} = 0$ получим:

$$\begin{aligned}
w'_+ &= \alpha t + \frac{\beta t^{1+\gamma}}{(1+\gamma)} + \dots \\
z_+ &= \frac{n^j \left(\frac{\alpha}{2} \right) t^2 + n^j \beta t^{2+\gamma}}{[(1+\gamma)(2+\gamma)]} + \dots \\
h &= \frac{\frac{1-\alpha m n t^2}{2} - \beta m n t^2 + \delta}{[(1+\gamma)(2+\gamma)]} + \dots
\end{aligned} \tag{5.22}$$

Подстановка этих разложения и (5.21) в уравнение (5.18) дает для α , β и γ следующие значения:

$$\alpha = \frac{1}{(\varepsilon m n)}, \beta = (m n - 1) \frac{[\varepsilon n^j + \delta(1 + m n)]}{[2(\varepsilon m n)^3]}, \gamma = 2 \tag{5.23}$$

Поскольку для $\xi = 0$ константы α и β обращаются в бесконечность, то при пренебрежении инерционными членами представление (5.21) оказывается несправедливым. Более того, при $\xi = 0$ из системы дифференциальных уравнения выпадает ускорение w_+ и следовательно не может быть удовлетворено начальное условие (5.20). Начальная скорость w_{+0} в безынерционном приближении получается при $\xi = 0$ из (5.18) и оказывается равной:

$$w_{+0} = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{\delta(1-m^2 n^2)}}} = W_0 \tag{5.24}$$

Вспомним, что за масштаб скорости был взят $\sqrt{gh}$, где h_0 - размерная начальная толщина слоя жидкости. Поэтому, например для $h_0 = 0.1$ м и $g = 9.8$ м/сек (5.24) дает размерную начальную скорость несвязанной жидкости в ПМ порядка $1 \div 2$ м/сек. Таким образом, хотя учет пропорционального w_{+0} скачка давления на ГР и обеспечивает конечность скорости w_{+0} , в типичных ситуациях она все же оказывается значительной для "линейной" (в смысле справедливости закона Дарси) теории. Если же наряду с инерционными слагаемыми ($\xi = 0$) пренебречь и этим эффектом, т.е. положить еще и $\delta = 0$, как обычно делается в классической теории фильтрации, то это даст $w_{+0} = \infty$. Действительно, (5.24) в

таком случае сводится к уравнению:

$$x' = 2\chi n^j (h + \sqrt{x}) \quad (5.25)$$

котором $x = z_+^2$ отсюда и из (5.25) найден, что

$$w_+ = \frac{\wp(h + \sqrt{x})}{z_+}$$

и поэтому при $t = 0$, когда $z_+ = 0$ и $x=0$, скорость w_+ становится бесконечной.

Итак, в согласии с проведенным анализом, учет инерционности жидкости ($\xi = 0$) обеспечивает, как это следует и из постановки задач А и Б, выполнение условия нулевой начальной скорости втекания ЖН в ПМ, а вместе с этим и скорости ФН: $D_0 = n w_{+0}$. Важно, что условию удовлетворяется вне зависимости от учета или пренебрежения скачком p на ГР. Если $\xi = 0$ при $\delta = 1$, т.е. в случае учета только второго эффекта (скачка p при $z=0$), то w_{+0} оказывается конечной, но отличной от нуля и к тому же в типичных ситуациях достаточно большой. Наконец, при пренебрежении обоими обсуждаемыми эффектами ($\xi = \delta = 0$) $w_{+0} = \infty$. По мере удаления ФН: $z=z_+(t)$ от ГР отличие результатов, получающихся при ξ и δ , равных нулю или единице, уменьшается, что является следствием малости безразмерного коэффициента фильтрации $\aleph$. В этой связи напомним, что $\aleph = k(mn\sqrt{gL})/c$ с $L=h_0$, причем в обычных ПМ $\aleph \ll 0.01$ м/сек. При $\aleph \ll 1$ в (5.18) при "старшей производной" (w'_+) появляется малый параметр, пропорциональный $\aleph$. В результате достаточно больших t (если, разумеется еще раньше не произойдет переход к случаю, изображенному на рисунке 5.9,в) решение системы (5.15) (5.18) и (5.19) практически перестает отличаться от своего "равновесного" аналога, удовлетворяющего уравнениям (5.15), (5.25) и (5.19).

Задачи А и Б легко обобщаются на любую конечную скорость столба жидкости, который, разгоняясь при $t < 0$, в момент $t=0$ соударяется с ГР: $z=0$. Если величина $w_{+0} = w_{-0}/(mn)$ в $W/(mn)$ при этом мала по сравнению со скоростью

звука в жидкости a_x , то решение таких задач проводится практически так же, как и ранее, с заменой (5.25) на:

$$w_{+0} = \frac{W}{(mn)} \quad (5.26)$$

а в случае необходимости - линейного закона Дарси (5.19) его нелинейными аналогами Правда, и теперь первые члены разложений для w_+ , z_+ ... по t , заменяющие полученные для $w_{+0}=0$ отрезки рядов (5.17) с коэффициентами (5.26) оказываются не зависящими от вида закона взаимодействия ЖН и ПИ. Действительно, при $w \ll a_{ж} mn$ из (5.26) и (5.25) при $\rho_0^+ = 0$ и $h_0=0$ имеем:

$$\alpha_1 = w'_{+0} = \frac{1}{(\varepsilon mn)} - \frac{\delta(1-m^2n^2)W^2}{[2\varepsilon(mn)^3]} = \frac{\alpha - \delta(1-m^2n^2)w^2}{[2\varepsilon(mn)^3]} \quad (5.27)$$

С α из (5.23). Отсюда, из (5.26) и (5.15) найдем, что теперь разложения (5.22) заменяться на:

$$w_+ = W + \alpha_1 t + \dots z_+ = n^j W t + \frac{n^j \alpha_1 t^2}{2} + \dots$$

$$h = 1 - W m n t - \frac{\alpha_1 m n t^2}{2} + \dots$$

Согласно (5.27) $m n \alpha_1$. т.е. начальное ускорение жидкости над ГР, при $W>0$ всегда меньше единицы (или g - для его размерной величины). Мало того, если:

$$W^2 > 2(mn)^2 - [\delta(1-m^2n^2)] = (mnW_0)^2 \quad (5.28)$$

с W_0 из (5.28), то начальное ускорение жидкости окажется отрицательным. Подчеркнем разницу между случаями $W=0$ и $W>0$. При $W=0$ мгновенное "снятие" перепада давления на слое жидкости ведет, как это и следовало ожидать в рамках несжимаемой жидкости, к мгновенному ускорению всего этого слоя до ускорения свободного падения (в безразмерных переменных до $w_{+0}=1$). Поскольку, однако, под ним оказывается ПМ, а не свободное пространство, то в тот же миг начинается уменьшение начального ускорения. В разложении (5.22)

для w_+ этому эффекту отвечает слагаемое, пропорциональное βt^3 с $\beta < 0$ из (5.23). Если же жидкость соударяется с ПМ с начальной скоростью $w_{.0} = W > 0$, имея при $t < 0$ ускорение, равное 1 (или g - для размерной его величины), то ее ускорение уменьшается мгновенно на конечную величину, а при $W > mnW_0$ даже становится отрицательным. Последнее неудивительно, ибо при соударении слоя несжимаемой жидкости с непроницаемым основанием сразу наступает покой, и, следовательно, в наших обозначениях $w_- = mnw$. Так как при $mn \rightarrow 0$ правая часть (5.28) также стремится к нулю, то тот же результат с учетом (5.27) и равенства получается и в рассматриваемой модели.

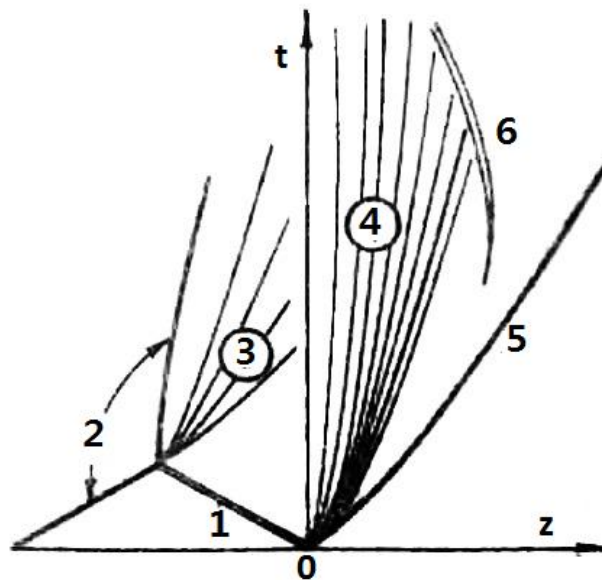


Рисунок.5.10 - zt – диаграмма втекания жидкости в ПМ с учетом сжимаемости

В связи с рассмотренным выше предельным переходом следует указать, однако, на ограниченность приближения несжимаемой жидкости. Действительно, из равенства (5.16) видно, что с ростом w , т. е. скорости соударения, и с уменьшением произведения mn рано или поздно нарушается условие:

$$w_+ = a_{жс}$$

как результат становятся существенными эффекты сжимаемости среды. Не вникая в детали возникающих при этом проблем, остановимся лишь на тех из

них, которые связаны с так называемым "запиранием" чаю отвечает zt -диаграмма на рисунке.5.10, где схематически изображены ГР (ось t) и траектории s СП, ФН, ударных волн, а также c^+ - и c^- - характеристик На запертых режимах, которые, грубо говоря, реализуются при $W > mnw_{ж}$ при $z=0$ выполняется условие откуда, в силу (5.1) $w_- = mnw_{ж} < W$. Так как $w_{-0} = w$, то из-за последнего неравенств» от ГР распространяется влево ударная волна (двойная линия 1 на рисунке 3.10). Ударная волна отражается от СП (жирная сплошная кривая 2 с изломом) в *виде* централизованной волны разрежения из c^+ - характеристик (тонкие кривые 3). В начальный момент $p = p(a_{ж})$ в общем случае оказывается положительным, из-за чего из начала координат выходит пучок волн разрежения из c^- - характеристик (тонкие кривые 4, включающие ось t левую граничную c^- -характеристику этого пучка). Другие c^- - характеристики, идущие от ФН (сплошной кривой 5), со временем формирует ударную волну (двойная кривая 6), которая распространяется против потока. Постепенно она "ликвидирует" пучок волн разрежения 4. В результате этого и прихода к ГР волн разрежения 3 в конце концов исчезают условия, необходимые для поддержания режима запирания, скорости потока уменьшаются и эффекты сжимаемости жидкости становятся несущественными. Однако еще раньше в областях интенсивного разрежения (например, при отражении пучка 3 от ГР) давление может упасть ниже предела, при котором жидкость обладает свойствами сплошной среды. В таких условиях происходит "откол"- разрушение жидкости на отдельные агрегаты (капли и т.п.).

Вернемся к исходной формулировке задач А и Б. Итак, в ПИ $w = w_+(t)$, а над ГР $w = w_-(t) = mnw_+(t)$, где $w_+(t)$ определяется из решения уравнений (5.15), (5.19), и (5.25) или их упрощенных вариантов при соответствующих начальных условиях. После или одновременно с $w_+(t)$ оставшиеся компоненты вектора скорости при $z > 0$ находятся интегрированием уравнений (5.21) при граничных условиях /10/

$$u(0, t) = u_0(t), v(0, t) = v_0(t) \quad (5.29)$$

а функции $u_0(t)$ и $v_0(t)$ определяются из тех же уравнений с

$1/\mathcal{K}=0$ и начальных распределений:

$$u(z,0) = U(z), v(z,0) = V(z); z \in [-1,0]$$

При этом можно воспользоваться тем, что согласно упомянутым уравнениям u и v над ГР сохраняются в частице и поэтому:

$$u_o(t) = U[\zeta(t)], v_o(t) = V[\zeta(t)], \zeta(t) = -mn \int_0^t W_+(\tau) d\tau$$

Смысл данного решения поясняют левые половинки zt -диаграмм на рисунке.5.9,а и в, где показаны траектории частиц (C -характеристик):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = W_-(t) = mnw_+(t)$$

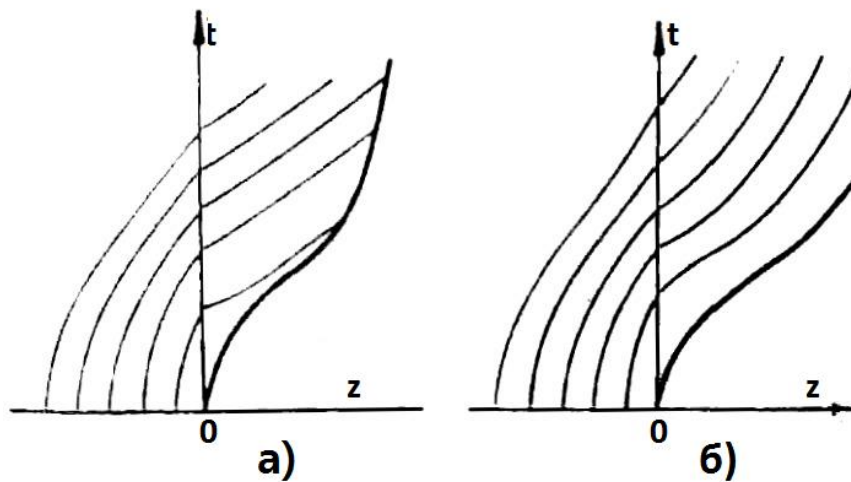


Рисунок 5.11 - Сетки траектория частиц (C^0 -характеристик)

Их интегрирование “в обратном направлении” от $\tau = t$ до $\tau = 0$ и определяет начальные координаты частиц над ГР. Уравнения (5.30) внутри ПМ вдоль C^0 -характеристик: $dz/dt = w_+(t)$, продолжающих на рисунке 5.11. C^0 -характеристики жидкости над ГР (при $z < 0$), также имеют вид обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{u}{\wp}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{v}{\wp},$$

Интегрируя их при начальных условиях (5.29), найдем, что

$$\begin{aligned} u(t, t_0) &= u_0(t_0) \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{\wp}\right] \\ v(t, t_0) &= v_0(t_0) \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{\wp}\right] \end{aligned} \quad (5.30)$$

где t_0 - момент пересечения частицей ГР. На рисунке 5.9,а частицы ФН в согласии ФН. На рисунке.5.11 ФН совпадает с одной из траекторий. Как уже упоминалось, обычно $\aleph \ll 1$. В таких условиях при u_0 и v_0 , не равных нулю, и u и v отличны от нуля в течении короткого интервала времени пребывания частицы в ПМ. Пусть $u(t)$ порядка или меньше единицы, что типично для многих задач фильтрации. Тогда, поскольку вдоль c^0 - характеристики $dt=dz/w_+(t)$, то можно пренебрегать x - и y - компонентами скорости везде, кроме слоя толщины $\aleph w_+(t)$.

Перейдем теперь еще к одной задаче - задаче В, постановку которой поясняет рисунке 5.9,в, .если на нем при $t=0$ совместить верхнюю границу ЗПН с ГР: $z=0$ и, кроме того, принять, что $z_{+e} = 1$. С ростом t в этой задаче между ГР: $z=0$ и только что упомянутой границей $z=z_-(t)$ из-за движения ЖН вниз возникает ЗЧН. Интегрируя при $z_-(t) \leq z \leq z_+(t)$ уравнение (3.7) с $w = w_+(t)$ и $\partial w / \partial t = dw/dt = w'_+(t)$, найдем, что:

$$\wp(z, t) = f(t) - \left(\frac{W_+}{\wp} + \varepsilon w'_+ \right) z$$

Определив затем $f(t)$ из условия (1.6) при $z = z_+$ где $p=0$ получим:

$$\rho = (\wp + z) = \left(\frac{W_+}{\wp} + \varepsilon w'_+ - 1 \right) (z_+ - z)$$

а это, в свою очередь для $z = z_-$ где также $p=0$, дает

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + q &= 0, (q = mnw_+(t)) \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)^2}{\partial x} + \frac{\partial\left(\frac{h^2}{2}\right)}{\partial x} + qu &= 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Система (5.30) записана в форме "законов сохранения" и потому допускает "сквозной счет", при котором поверхности разрыва и "гидравлические прыжки"), возможные в теории мелкой воды, получаются как области непрерывного, но резкого изменения h и u . Заметим, что сказанная выше оговорка "почти всюду" относится как раз к гидравлическим прыжкам, где изменение h и u происходит на нулевой длине. На самом деле, ссылаются интегральные законы сохранения, имеющие вид:

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} (-hdx + hudy) \iint_{\delta} q dx dt &= 0 \\ \oint_{\Gamma} \left[-hdx + \left(\frac{h^2}{2} \right) dy \right] \iint_{\delta} qu dx dt &= 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

где δ - произвольная площадка в плоскости xt , а Γ - ее граница. В подобластях непрерывности параметров из (5.30) следуют дифференциальные уравнения (5.31), а на гидравлических прыжках, движущихся со скоростью D :

$$[h](u - D) = 0, [2uh](u - D) + h^2 = 0 \quad (5.32)$$

Здесь (φ) - разность значений φ на разрыве. В согласии со сказанным ранее, при интегрировании (5.31) по схемам сквозного счета параметры с разных сторон от размазанного гидравлического прыжка, автоматически удовлетворяют условиям (5.32).

В подобластях непрерывности параметров система (5.32) гиперболична и эквивалентна следующим уравнениям, записанным в "характеристической" форме.

$$\begin{aligned}\frac{d^{\pm} I^{\pm}}{dt} &= \frac{\pm q}{\sqrt{h}}, I^{\pm} = u \pm 2\sqrt{h} \\ \frac{d^{\pm}}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + (u \pm \sqrt{h}) \frac{\partial}{\partial x}\end{aligned}\tag{5.33}$$

В этих соотношениях $I^{\pm}$ - инварианты Римана, а $d^{\pm}/dt$ - операторы полного дифференцирования по t , соответственно вдоль c^+ -и c^- -характеристик, где

$$c^{\pm} : \frac{dx}{dt} = u \pm \sqrt{h}\tag{5.34}$$

Как видно из (5.33) и (5.34), $\sqrt{h}$ в теории мелкой воды (в размерной форме - $\sqrt{gLh}$), играет ту же роль, что скорость звука в газовой динамике. Поэтому, если на левой границе рассматриваемой области $u_1 = \sqrt{h_1}$, то здесь (при $x = x_1$), как и при "сверхзвуковом втекании" следует задавать u_1 и h_1 . При $\sqrt{h_1} > u_1 > 0$ на той же границе ставится одно условие (на u_1 , h_1 или любую их функцию, отличную от I^-). Аналогично на правой границе (при $x=x_r$) при $u_2 = \sqrt{h_r}$ не ставится ни одного условия, а при необходимо задавать либо u_r , либо h_r , либо любую их функцию, отличную от I^+ . Высказанные соображения о числе граничных условий, полностью совпадающие с соответствующими правилами газовой динамики, справедливы до тех пор, пока течение в окрестности рассматриваемой границы непрерывно. При допущении разрыва, идущего от границы, число условий на ней может быть увеличено, хотя и в таких случаях (т.е. при допущении разрыва) возможное "превышение" числа указанных условий заранее неизвестно и каждый раз должно находиться из решения задачи о распаде произвольного разрыва.

При течении жидкости над ПМ системы уравнений и условий (5.24) - (5.32) следует дополнить уравнениями движения ЖН в ПМ, поскольку только совместное рассмотрение потоков над и под ГР: $z=0$ позволяет найти входящую

в (5.30) и (5.31) плотность тока q жидкости, фильтрующейся в ПМ. Хотя в рассматриваемой задаче в общем случае параметры жидкости под ГР зависят от времени и двух пространственных переменных z и x , типична ситуация, когда функция $z_+(t, x)$, определяющая ФН: $z = z_+(t, x)$, существенно меньше продольного (т.е. по x) масштаба течения. В таких условиях производными по x в уравнениях течения ЖН в ПМ можно пренебречь, и следовательно течение под ГР при каждом x будет по-прежнему описываться уравнениями одномерной нестационарной фильтрации, изученными в предыдущих разделах. Отличие от указанных разделов теперь, однако, будет состоять в том, что решение через $p^+ = p^+(t, x)$, а также через времена появления или исчезновения жидкости над ГР "параметрически" зависит и от x . Кроме того, в формуле (3.26) для p^+ в данном приближении из-за зависимости потока над ГР от x нет смысла удерживать инерционное слагаемое, пропорциональное w_+^2 . В результате (3.26) заменится на:

$$\rho^{\pm} = h + \delta(m^2 n^2 - 1) \frac{w_+^2}{2}$$

что ведет к некоторому упрощению последующих соотношений.

Не останавливаясь на дальнейших подробностях, обсудим схему реализации в рассматриваемом приближении так называемого "импульсного полива", под которым понимается следующее. Рассмотрим отрезок $0 < x < X$, где "длина борозды" X - заданная константа, причем если масштаб L - характерная высота слоя жидкости над ПМ, то $X \gg 1$. На правом конце отрезка (при $x = x_f = X$) поставим условие непротекания $u = 0$. Пусть далее сечение $x = x_l = 0$ - "левая граница борозды" совпадает с "задвигной", регулирующей подачу жидкости в борозду. Если задвижка закрыта, то:

$$u(t, 0) = u_l(t) = 0 \quad (5.35)$$

При открытой задвижке, в согласии со сказанным выше, число условий, задаваемых при $x = 0$, зависит от отношения $Fr = u_1 / \sqrt{h_1}$, называемого числом Фруда и являвшегося эквивалентом числа Маха в газовой динамике. При $Fr > 1$, что отвечает истечению из узкой щели при сравнительно высоком перепаде

давления, при $x=0$ необходимо задавать и u_1 и h_1 , т.е.

$$u(t,0) = u_1(t), h(t,0) = h_1(t), \quad (5.36)$$

с известными функциями $u_1(t)$ и $h_1(t)$. Если $Fr < 1$, то задается одна из этих функций. Заметим, кстати, что при квазистационарном истечении из цели высоты h у основания большого открытого сосуда высоты H (по уровню жидкости) в силу интеграла Бернулли $Fr = \sqrt{2(H-h)/h}$. Следовательно, здесь $Fr > 1$, если $H > 3h/2$. Таким образом, закрывая задвижку при фиксированном H , мы с уменьшением h неминуемо выходим на режим "сверхзвукового истечения". Если же в течении всего процесса $H > 3h/2$, то в квазистационарном режиме истечения интервалы закрытия задвижки, на которых при $x=0$ реализуется условие не протекания (5.35), сменяются интервала - ни времени, на которых выполняются условия (5.36) с заданным (t) и:

$$u_1(t) = \sqrt{2[H - h_1(t),]}$$

"Волна сжатия", формирующаяся при открытии задвижки, когда имеет место рост высоты $h_1(t)$, аналогичной давлению в газовой динамике, может приводить при распространении ее вправо к образованию гидравлического прыжка. При отражении от правого конца борозды высота прыжка увеличивается. Закрытие задвижки формирует также распространяющуюся вправо волну разрежения. Импульсному поливу отвечает почти ступенчатая функция $h_1(t)$ с короткими временами открытия и закрытия задвижки и существенно большими интервалами времени, в течении которых $h_1(t) = h_1 > 0$ или $h_1(t) = 0$. При $X \gg 1$ при "первом поливе" фильтрующийся поток может не достичь правого конца борозды. Далее, при сравнительно большом временном промежутке между последовательными поливами, новый импульс будет распространяться по ПМ, представляемому собой ЗЧН, и т.д. Некоторое представление о многообразии возникающих при этом ситуаций дает z -диаграмма на рисунке 5.10, которая демонстрирует динамику намокания ПН в некотором промежуточном сечении борозды. На рисунке 5.12. при $t < 0$, $t_1 < t <$

t_2 и при $t < t_4$ жидкость над ПМ в рассматриваемом сечении отсутствует; ломаная $z = z_+(t)$ дает траекторию ФН, справа от которого находится ЗСМ; кривая $z = z_+(t)$ - траектория ФН, возникающего при повторном поливе идвигающегося по ЗЧН; кривые $z = z_-(t)$ - траектории задних границ ЗПН. Схема на рисунке 5.12. отвечает решению задачи фильтрации без учета инерционных членов ($\xi = 0$) и скачка давления на ГР ($\delta = 0$).

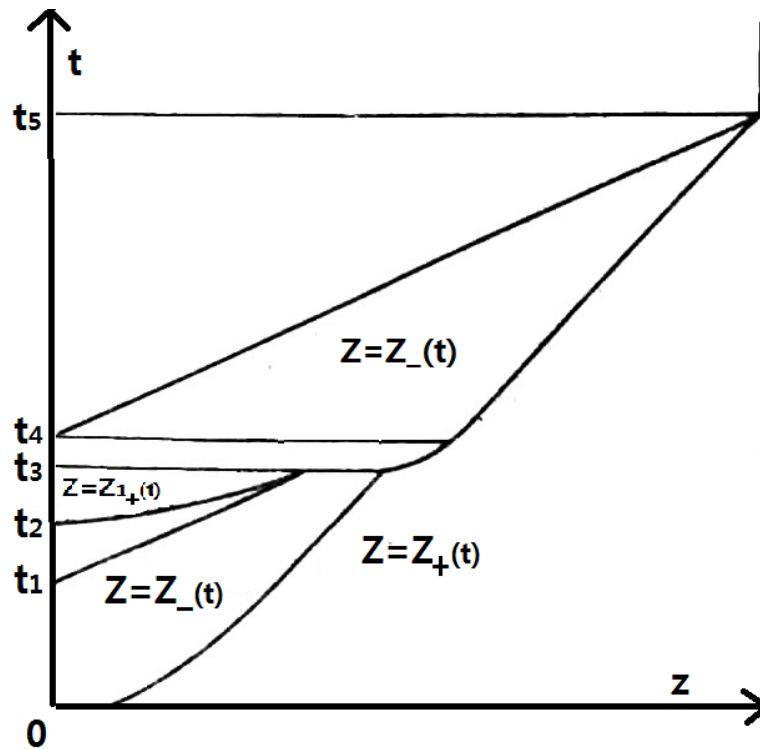


Рисунок 5.12 - zt-диаграмма "импульсного полива"

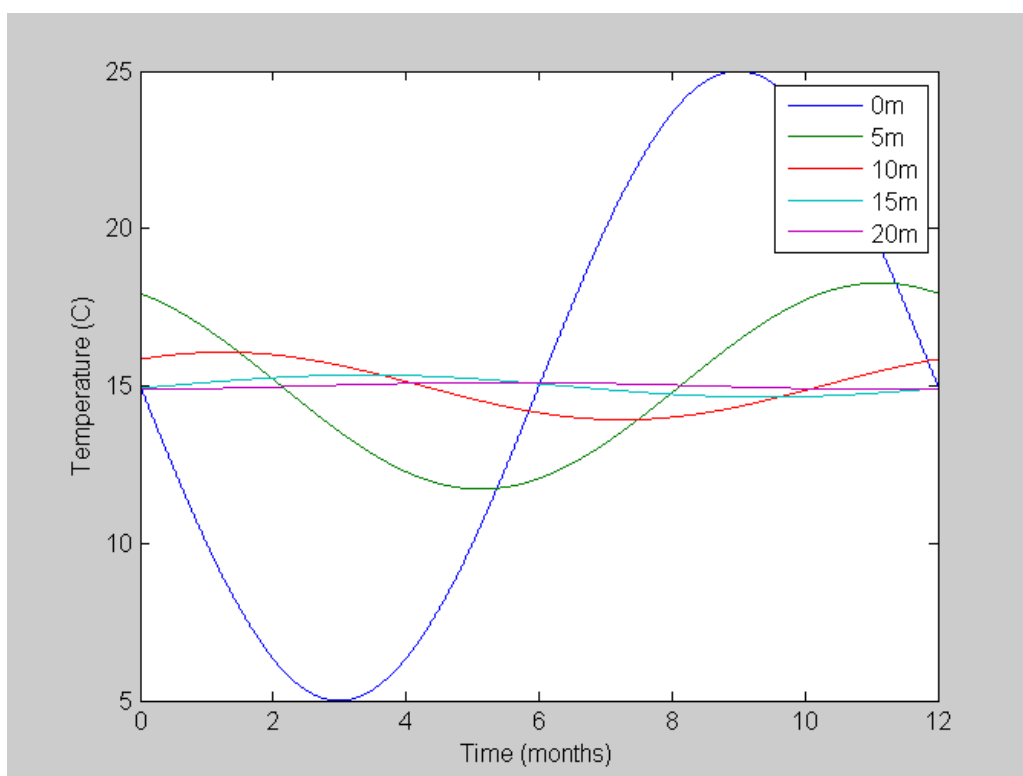


Рисунок 5.13 - Тепловлагоперенос в пористой среде

5.3. Выводы по главе

Рассмотрена математическая модель расчета переноса осредненной по высоте пассивной примеси над термически и орографически неоднородной территорией. Применена двумерная модель, полученная путем интегрирования по высоте уравнений гидротермодинамики атмосферы. А также получены численные расчеты фильтрации потоков жидкости в пористую среду с учетом разрыва пористости для оценки гидродинамических процессов, влияющих на климатическую систему региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования разработаны и применены математические модели для анализа и прогнозирования климатических параметров в отдельных регионах Кыргызстана, а также выбросов загрязняющих веществ и процессов тепловлагопереноса в пористых средах.

Проведенный анализ климатических данных за последние 100 лет показал, что в регионе наблюдается устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха, что подтверждается результатами моделирования с использованием нейронных сетей. Прогнозирование среднемесячной температуры воздуха с применением моделей LSTM, XGBoost продемонстрировало высокую точность и обобщающую способность, что позволяет использовать данный подход для долгосрочного прогнозирования климатических изменений.

Разработанные численные модели переноса CO₂ и др. загрязняющих веществ в атмосфере, основанные на уравнении Навье-Стокса и диффузионных уравнениях, позволили исследовать влияние различных метеорологических факторов и препятствий на распространение примесей. Численные эксперименты, выполненные с использованием программных комплексов **ANSYS Fluent** и **ANSYS CFX**, показали, что скорость и дальность распространения загрязняющих веществ зависят от скорости и направления ветра, температуры выбросов и стабильности атмосферы. Полученные результаты могут быть использованы при экологическом мониторинге и разработке рекомендаций по снижению вредного воздействия промышленных выбросов.

Исследование процессов тепловлагопереноса в пористых средах позволило выявить влияние неоднородности пористой структуры на динамику инфильтрации жидкости. Численные расчеты подтвердили, что учет разрыва пористости играет важную роль в прогнозировании фильтрационных процессов,

что может быть полезно для гидрологических исследований, проектирования ирригационных систем и управления водными ресурсами.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные математические модели и численные методы могут быть применены для анализа и прогнозирования климатических параметров, оценки выбросов загрязняющих веществ, оптимизации экологической политики и решения задач, связанных с управлением водными ресурсами и устойчивым развитием регионов.

Таким образом, проведенное исследование вносит вклад в развитие методов регионального климатического моделирования и экологического прогнозирования, а его результаты могут быть использованы как в научных исследованиях, так и в практике климатического и экологического мониторинга в Кыргызской Республике.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты диссертационных исследований могут использоваться:

- для анализа и прогнозирования климатических параметров, оценки выбросов загрязняющих веществ, оптимизации экологической политики и решения задач, связанных с управлением водными ресурсами и устойчивым развитием регионов;

- при экологическом мониторинге и разработке рекомендаций по снижению вредного воздействия промышленных выбросов;

- для адаптации сельскохозяйственного сектора к изменениям климата.

2. На основе прогноза динамики выбросов углекислого газа необходимо разработать меры по сокращению антропогенных выбросов, включая совершенствование законодательства в области экологии и внедрение технологий улавливания CO₂.

3. Прогнозируемый рост выбросов требует усиленного контроля со стороны экологических организаций, что может быть достигнуто за счет автоматизированного мониторинга выбросов с применением технологий машинного обучения.

4. В сельском хозяйстве стоит пересмотреть стратегии орошения, внедряя технологии по накоплению и эффективному использованию атмосферных осадков.

5. Разработанные численные модели переноса загрязняющих веществ могут быть использованы для оптимизации размещения промышленных предприятий и проектирования систем фильтрации выбросов.

6. Созданные математические модели могут быть применены для прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с изменением атмосферных процессов.

7. Полученные данные целесообразно использовать при проектировании объектов инфраструктуры, чувствительных к климатическим изменениям

(например, гидроэлектростанций, плотин и систем водоснабжения).

8. Результаты численных экспериментов подтверждают необходимость учета метеоусловий при прогнозировании распространения примесей, включая радиоактивные вещества.

9. Рекомендуется создание комплексной системы экологического мониторинга, основанной на интеграции метеорологических данных и моделей переноса загрязняющих веществ.

10. Выявленные закономерности фильтрации жидкостей в пористых средах можно использовать для рационального управления водными ресурсами, особенно в районах с проблемами водоснабжения.

11. Данные модели могут помочь в прогнозировании риска засух и разработке стратегий по сохранению водных ресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абдрасакова А.Б., Сулайманова С.М. Анализ климатических данных с помощью нейронных сетей [Текст]/ Абдрасакова А.Б., Сулайманова С.М.//Вестник КГУСТА, 2022.- № 3(77). – С.140-146.
2. Абдрасакова А.Б., Картанова А.Дж, Сулайманова С.М. Численное моделирование переноса пассивной примеси над ограниченной территорией.[Текст] / Вестник КГУСТА, Вып. 75 (1), Бишкек, 2022г.
3. Абдрасакова А.Б. Компьютерное моделирование температуры воздуха с использованием обобщенных регрессионных нейронных сетей. [Текст] / Известия ВУЗов Кыргызстана, № 2, 2023г.
4. Абдрасакова А.Б. Абанын температурасынын өзгөрүшүн болжолдоо үчүн нейрондук тармак ыкмаларын колдонуу. [Текст] / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, № 5, 2023г.
5. Абдрасакова А.Б. Түтүктөрдөн абаны булгоочу заттардын дисперсиясы үчүн ANSYS - CFX негизинде симуляциялык программасын 3D моделдөө [Текст] / МУИТ. Наука и инновационные технологии. №4, 2023г.
6. Абдрасакова А.Б.Применения рекуррентных нейронных сетей LSTM для прогнозирования временных рядов среднемесячной температуры воздуха [Текст] /Сулайманова С.М./ МУИТ. Наука и инновационные технологии. №4, 2023г.
7. Алексеев Г.А. Динамика инфильтрации дождевой воды в почву. [Текст] / Алексеев Г.А – «Тр.ГГИ», 1948,вып.6.с.43-72
8. Андерсон Д.Дж. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: [Текст] / Андерсон Д., Таннехилл, Р. Плетчер в 2-х т.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.- 384. С., ил.
9. Бабков В.С., Донецкий национальный технический университет. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников [Текст] / Бабков В.С., Т.Ю. Ткаченко

- 10.Бабушка И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений.
[Текст] / Бабушка И., Ватасек Э., Прачер М М., «Мир», 1969.
- 11.Баренблатт Г.И. Неравновесная фильтрация несмешивающихся жидкостей
[Текст] / Баренблатт Г.И., Винниченко А.П.Успехи механики. 1980. Т.3,
вып.3. С.35-50.
- 12.Баренблатт Г.И.Движение жидкостей и газов в природных пластах [Текст] /
Баренблатт Г.И.,Ентов В.М., Рыжик В.И.М.: Недра. ,984. 208 с.
- 13.Бильгаева Л. П. Исследование моделей нейросетевого прогнозирования в
среде MATLAB [Текст] / Л.П.Бильгаева, К.Г.Власов // Приложение
математики в экономических и технических исследованиях. — 2017. — No 1
(7). — С. 11–19.
- 14.Бойко В.В. Анализ методов математического моделирования
распространения загрязняющих веществ в атмосфере /экологическая
безопасность. [Текст] / Бойко В.В., Пляцук Л.Д. суммы 2010, №6 с.1-4.
- 15.Борзенков А.В.Дифференциальные уравнение в частных производных
Matlab. Конспект лекций для студ. [Текст] /Министерство образ.Республики
Беларусь. Учреждение образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиотехники».
- 16.Будаговский А.И. Система уравнений тепло- и влагообмена в растительном
покрове. [Текст]/Будаговский А.И.,Лозинская Е.А. Водные
ресурсы.1976,№1,с.78.-94.
- 17.Будаговский А.И. Количественная теория фотосинтеза и ее использование
для решения научных и практических задач физической географии. [Текст]
/ Будаговский А.И.,Ничипорович А.А., Росс Ю.К. Изв.АН СССР:Сер.геогр.,
1964, №6. с.13-27.
- 18.Будаговский А.И. Основы количественной теории фотосинтетической
деятельности посевов. [Текст] / Будаговский А.И., Росс Ю.К. В кн.:
Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М., Наука, 1966,
с.51-58.

- 19.Будаговский А.И. Вертикальное распределение потоков длинооволновой радиации и радиационного баланса в растительном покрове. [Текст] / Будаговский А.И. , Росс Ю.К., Тооминг Х.Г. В.Кн: Актинометрия и оптика атмосферы. Валгус,1968, с. 299-307.
- 20.Будаговский А.И.Испарение почвенной влаги. [Текст] /М., «Наука», 1964,243с.
- 21.В.В.Сидорик Практикум по моделированию в среде Matlab. [Текст] / В.В.Сидорик ,С.Г. Погирницкая Учебно-метод пособ
- 22.Васильев А. Н.МATLAB. САМОУЧИТЕЛЬ. ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД. 2-Е ИЗДАНИЕ. [Текст] / Васильев А. Н, СПб.: Наука и Техника, 2015. — 448 с.: ил.
- 23.Веригин Н.Н. Движение влаги в почве [Текст] / Веригин Н.Н. Докл. АН СССР. 1953. Т.89, N 2 . С. 229-232.
- 24.Веригин Н.Н. Смачивание почвы при орошении посредством дождевания [Текст] / Веригин Н.Н. Докл. АН СССР. 1953. Т.89, № 4 С. 627-630.
Вестник Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,
25. Второе национальное сообщение Кыргызской Республики по рамочной конвенции ООН об изменении климата [Текст] / - Режим доступа:[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Kyrgyztan%20SNC_Russian_0.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Kyrgyzstan%20SNC_Russian_0.pdf)
- 26.Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: Методическое пособие для учебной и научной работы студентов направления 270800 – «Строительство» (квалификация «бакалавр» и «магистр») и аспирантов специальности 05.23.03[Текст] / А.М. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. – 79 с.
- 27.Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст] / Гарбарук, Х.М. Стрелец, Л.М. Шур. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
- 28.Главное управление гидрометеорологической службы при совете министров

- СССР. Среднеазиатского регионального научно-исследовательский гидрометеорологический институт. [Текст] / Труды выпуск 26
- 29.[Глубокое обучение в MATLAB - MATLAB & Simulink \(mathworks.com\)](https://www.mathworks.com/)
- 30.Годунов С.К. и др Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. М.: Наука. 1976. 400 С.
- 31.Годунов С.К. Разностные схемы. [Текст] / Годунов С.К., Рябенский В.С. М., «Наука», 1973. 400с.
- 32.Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Труды среднеазиатского регионального научно-исследовательского института им.В.А.Бугаева. Математическое моделирование гидрометеорологических процессов. [Текст] /Выпуск 11(192),1-81 Москва гидрометиздат 1986
- 33.Денисов Ю.М. Перенос влаги и тепла в почве (неподвижной пористой среде). [Текст] / Денисов Ю.М. «Тр. САНИГМИ», 1968, вып.38(54), с.3-19.
- 34.Дымников В.П. Современные проблемы математической теории климата. [Текст] / Дымников В.П., Грицун А. С. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2005. — Том 41, т. С. 266-284.
- 35.Емалетдинова Л. Ю. Метод построения прогнозной нейросетевой модели временного ряда [Текст] / Л. Ю. Емалетдинова, З. И. Мухаметзянов, Д. В. Катасёва, А. Н.
- 36.Емалетдинова Л. Ю. Метод построения прогнозной нейросетевой модели временного ряда. - [Текст] / Емалетдинова Л. Ю., З. И. Мухаметзянов, Д. В. Катасёва, А. Н. Кабирова. Компьютерные исследования и моделирование 2020, Т. 12 № 4 С. 737–756.
- 37.Ентов В.М. Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах (математические методы повышения нефтеотдачи пластов) [Текст] / Ентов В.М. Успехи механики. 1981. Т.4, вып.3. С.41-79.
- 38.Изменение климата Бишкека за столетие 1930-2030гг. [Текст] /Ю.А.Подрезова, О.А.Подрезов. Вестник КРСУ 2021, Том 21 №12 с.192-

- 198с.
39. Ильясов Ш. Климатический профиль Кыргызской Республики [Текст] / Ш.Ильясов, О. Забенко, Н.Гайдамак и др. - Б.: 2013 - 99 с.
40. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. Пособ. [Текст] / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т, 2010.-271 с.: ил.
41. Использование программного пакета FLUENT для решения задач по газодинамике [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам [Текст] / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, Д. А. Угланов; - Электрон. текстовые и граф. дан. (8,65 Мбайт). - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)
42. Клинцинг Г.Е. Влияние переменных коэффициентов диффузии и скорости на рассеивание загрязнителей. [Текст] / Клинцинг Г.Е., Л.К. Петерс, Atmos Environ 5 (1971), 497-504.
43. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы [Текст] / М.: Мир. 1964. 350 С.
44. Копченко Н.В. Вычислительная математика в примерах и задачах. [Текст] / Копченко Н.В., Маров И.А. М. «Наука», 1972. 367с.
45. Кочергин В.П. К вопросу о численном моделировании гидротермодинамических задач океана [Текст] / Кочергин В.П., Складар С.Н., Султанов Р.К.// Морской Гидрофизический журнал. -1990. -№ 2. -С. 10-18.
46. Крайко А.Н. К двухжидкостной модели течений газа и диспергированных в нем частиц [Текст] / Крайко А.Н. ПММ. 1982, вып.1. С. 96-106.
47. Крайко А.Н. К теории двухжидкостных течений смеси газа и диспергированных в нем частиц [Текст] / Крайко А.Н. Гидродинамика и теплообмен в двухфазных средах. Материалы II Всесоюзной школы по теплофизике. Новосибирск. АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. 1981. С. 42-52.

- 48.Крайко А.Н. В течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости [Текст] / Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О ПМТФ. 1982, N 1. С. 111-118.
- 49.Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2021.
- 50.Лейбензон Л.С. Подземная гидрогазодинамика. [Текст] / Лейбензон Л.С. Собрание трудов. Т.2 // М.: АН СССР. 1963. 564 с.
- 51.Лыков А.В. Теория сушки. [Текст] / Лыков А.В. М., «Энергия», 1968.471с.
- 52.Лыков А.И. Массотеплоперенос в капиллярно – пористых средах. – В кн. Тепло и массообмен в процессах испарения. [Текст] / Лыков А.И. М., Изд-во АН СССР, 1958, с.7-14. Тепло и массообмен в процессах испарения. М., Изд-во АН БССР, 1965, с.3-27.
- 53.Лыков А.И. Тепло и массообмен в процессах при фазовых и химических превращениях. – В кн. Тепло и массообмен в процессах испарения. [Текст] / Лыков А.И. М., Изд-во АН СССР, 1958, с.7-14.
- 54.М.Л. Лобанов «Методы определения коэффициентов диффузии» учебное пособ. [Текст] / М.Л. Лобанов, М.А.Зорина Уральский федеральный университет им. Президента России Б.Н.Ельцина Институт новых материалов и технологий. Екатеринбург Издательство Уральского университета 2017
- 55.Манукян А.А. Исследование траектории распространения загрязнений от точечного источника в зависимости от характера ландшафта. [Текст] / Манукян А.А., Селиверстова Т.В., Национальная металлургическая академия Украины, г.Днепр, Украина. Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация, 2017г. №2.48-52с.
- 56.Марчук Г.И. Методы вычислительной математики [Текст]/ Марчук Г.И. -М.: Наука, 1989. -608 с.
- 57.Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. [Текст] / Матвеев Л.Т. Л.: Гидрометеиздат, 1984.-751 с.

58. Махмудов А.А. Распространение метода SHASTA на численное решение двумерных нестационарных уравнений мелкой воды [Текст] / Махмудов А.А. Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т.27, N 8. С.1262-1266.
59. Махмудов А.А. Численное решение некоторых задач теории мелкой воды [Текст] / Махмудов А.А. Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1967. Т.27, №5. С. 788-791.
60. МГЭИК. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов [Текст] / [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>
61. Мезингер Ф. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. [Текст] / Мезингер Ф., Аракава А. Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 136с.
62. Михайлов Г.К. Движение жидкостей и газов в пористых средах [Текст] / Михайлов Г.К., Николаевский В.Н. Механика в СССР за 50 лет. Т.2. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1970. С. 585-648.
63. Наумов В.А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждение в водотоке. [Текст] / Наумов В.А.
64. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Кыргызской Республики за 2015–2018 годы [Текст] / [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <http://aarhus.kg/ru/sostoyanie-okruzhayushhej-sredy-kr>
65. Нерпин С.В. Физика почвы. [Текст] / Нерпин С.В., Чудовский А.Ф. М., «Наука», 1967. 583с.
66. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. [Текст] / Нигматулин Р.И. И.: Наука. 1978. 336 с.
67. Определение температуры грунта на глубине заземлителей. [Текст] / Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б., Клецель М.Я. Журнал «Электричество» №7, 2011 с.19-24с.
68. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. [Текст] / Патанкар С. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат,

- 1984.-152 с., ил.
- 69.Патанкар С. Тепло- и массообмен в пограничных слоях. [Текст] / Патанкар С., Д. Сполдинг Пер. с англ. М., Энергия. 1971.
- 70.Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. Т.1 [Текст] / Педлоски Дж. М.: Мир. 1984. 400 С.
- 71.Пененко В.В. Оптимальное прогнозирование природных процессов с оценкой неопределенности [Текст] / Пененко В.В., Цветова Е.А. ПМТФ, 2009. № 2. - С. 156-166.
- 72.Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. [Текст] / Полубаринова-Кочина П.Я. М.: Наука. 1977. 664 с.
- 73.Расчетные методы прогноза водного режима и его регулирования. – В кн.Физика, химия, биология и минералогия почв СССР (докл. к VII Международному конгрессу почвоведов). [Текст] / М., «Наука», 1964, с.32-41. Авт.: Бондаренко Н.Ф., Корчунов С.С., Нерпин С.В., Судницын И.И., Якобс А.И.
- 74.Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. [Текст] / Роде А.А. Т.1Л., Гидрометеиздат, 1965. 663с.
75. Ростовцев В.С. - Искусственные нейронные сети. [Текст] / Ростовцев В.С.: учебник - Издательство "Лань" -2019 - 216с.
- 76.Рубин Дж. Поглощение дождевых вод почвами исходно более сухими, чем их полевая влагемкость. [Текст] / Рубин Дж. В кн.: Изотермические передвижение влаги в зоне аэрации. Л., Гидрометеиздат, 1972, с.149-167.
- С НЕОДНОРОДНЫМИ КОЭФИЦИЕНТАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ М. В. Васильева, Г. А. Прокопьев
- 77.Сергеев А.И. Схема расчета испарения с поверхностями почвы. [Текст] / Сергеев А.И. «Тр. САНИГМИ», 1972, вып. 62(77), с.75-83.
- 78.Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Бишкек (город Бишкек, Киргизия)
- 79.Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Иссык-Куль (Иссык-

Кульская область, Киргизия)

80. Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Нарын (Нарынская область, Киргизия)
81. Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Ош (город Ош, Киргизия)
82. Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Талас (Таласская область, Киргизия)
83. Теория и практика управление. Глобальное изменение климата и его последствия. [Текст] /Л. В. Бондаренко, О. В. Маслова, А. В. Белкина, К. В. Сухарева
84. Федеральное госулар.автномное образов. учреждение высшего образов. [Текст] /Национальный исследовательский Томский Политехнический университет. Проведение статического анализа в ANSYS Worknpench.Томск 2023.
85. Федорова Н. Н. Основы работы в ANSYS 17.- Основы работы в ANSYS 17. [Текст] / Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.
86. Филип Дж.Р. Теория инфильтрации. – В кн.: Изотермические передвижение влаги в зоне аэрации. [Текст] / Филип Дж.Р. Л., Гидрометеиздат, 1972, с.6-83.
87. Чайлдс Э. Физические основы гидрологии почв. [Текст] / Чайлдс Э. Л., Гидрометеиздат, 1973. 427с. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
88. Чубаров В.Н. Питание грунтовых вод песчаной пустыни через зону аэрации. [Текст] / Чубаров В.Н. М., «Недра», 1972. 132с.
89. Эдлефсен Н.Е. Термодинамика почвенной влаги. [Текст] / Эдлефсен Н.Е., Андерсон А.Б. – В кн.: Термодинамика почвенной влаги. Л., Гидрометеиздат, 1966, с. 3 – 273.
90. Юн, А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений [Текст]

- / Юн А.А.. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 272 с.
91. Aggarwal C.C., Neural Networks and Deep Learning. [Текст] /A Textbook. Springer International Publishing AG, 2018.
92. Ansys / Engineering Simulation Software
93. ANSYS Fluent Theory Guide
94. Buckley S.E., Leverett M.C. Mechanism of fluid displacement in sands // Trans. AIME. 1942. Vol.146. P.107-116.
95. CFD Training Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.engr.uconn.edu/~barbertj/CFD%20Training/UConn%20Modules/CFD%20Training%20Manual.docx> . – Загл.с экрана.
96. Deepti Arel, Shilpa Agrawal. Demand forecasting by using generalized regression neural network. - Open access international journal of science and engineering (OAIJSE). - Volume 03, Issue 02, Year: 2018, Pages:39-45.
97. F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®.- Springer International Publishing Switzerland 2016.
98. <http://kmauo.org/wp-content/uploads/2018/02/Manukian.pdf>
99. <http://www.pogodaiklimat.ru/history/38353.htm>
100. Smith F. B.. The Diffusion of Smoke from a continuous elevated point source into a turbulent atmosphere, J Fluid Mech 2 (1957), p49-76.
101. Vojislav, Kecman Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models (Complex Adaptive Systems) / Vojislav Kecman. - Москва: Машиностроение, 2022 – с. 333-358.
102. Zanneti P.. Air pollution modeling theories, computational methods and available software, Computational Mechanics Publications, New York, 1990.

ПРИЛОЖЕНИЕ1. ЛИСТИНГ ПРОРАММЫ

Фрагмент кода

модели диффузионного рассеивания дымовых выбросов в атмосферу с использованием программного комплекса ANSYS CFX

This run of the CFX-15.0 Solver started at 13:19:21 on 26 Oct 2023 by
user PC on WIN-CG12TBSM04A (intel_xeon64.sse2_winnt) using the
command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v150\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch  
-ccl runInput.ccl -fullname CFX_002
```

Point Releases and Patches installed:

ANSYS, Inc. Products 15.0
ANSYS Mechanical Products 15.0
ANSYS Customization Files 15.0
ANSYS Autodyn 15.0
ANSYS LS-DYNA 15.0
ANSYS CFX (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
ANSYS Fluent (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
ANSYS TurboGrid 15.0
ANSYS Polyflow (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
ANSYS CFD-Post only 15.0
ANSYS Aqwa 15.0
ANSYS ICEM CFD 15.0
ANSYS Icepak (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
ANSYS Remote Solve Manager Standalone Services 15.0
ANSYS, Inc. License Manager 15.0

Setting up CFX Solver run ...

+-----+

LIBRARY:

MATERIAL:diffuse model of the smoke pipe

Material Description = diffuse model of the smoke pipe
(constant Cp)

Material Group = Air Data

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Zero Pressure Polynomial

Zero Pressure a1 = 3.27149

Zero Pressure a2 = 0.000685475444 [K⁻¹]

Zero Pressure a3 = 0 [K⁻²]

Zero Pressure a4 = 0 [K⁻³]

Zero Pressure a5 = 0 [K⁻⁴]

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Option = Sutherlands Formula

Reference Temperature = 273 [C]

Reference Viscosity = 17.12e-6 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Sutherlands Constant = 111 [K]
 Temperature Exponent = 1.5
 END
 THERMAL CONDUCTIVITY:
 Option = Value
 Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m⁻¹ K⁻¹]
 END
 ABSORPTION COEFFICIENT:
 Absorption Coefficient = 0.01 [m⁻¹]
 Option = Value
 END
 SCATTERING COEFFICIENT:
 Option = Value
 Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]
 END
 REFRACTIVE INDEX:
 Option = Value
 Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]
 END
 END
 END
 END
 FLOW: Flow Analysis 1
 SOLUTION UNITS:
 Angle Units = [rad]
 Length Units = [m]
 Mass Units = [kg]
 Solid Angle Units = [sr]
 Temperature Units = [K]
 Time Units = [s]
 END
 ANALYSIS TYPE:
 Option = Steady State
 EXTERNAL SOLVER COUPLING:
 Option = None
 END
 END
 DOMAIN: R1

```

Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Fluid
Location = Passage Main
BOUNDARY: R1 Blade
  Boundary Type = WALL
  Frame Type = Rotating
  Location = BLADE
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Adiabatic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No Slip Wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth Wall
    END
  END
END
BOUNDARY: R1 Hub
  Boundary Type = WALL
  Coord Frame = Coord 0
  Frame Type = Rotating
  Location = HUB
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Adiabatic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No Slip Wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth Wall
    END
  END
END
BOUNDARY: R1 Inlet
  Boundary Type = INLET

```


Frame Type = Stationary
 Location = INFLOW
 BOUNDARY CONDITIONS:
 FLOW DIRECTION:
 Option = Cylindrical Components
 Unit Vector Axial Component = 0.707
 Unit Vector Theta Component = 0.707
 Unit Vector r Component = 0
 END
 FLOW REGIME:
 Option = Subsonic
 END
 HEAT TRANSFER:
 Option = Stationary Frame Total Temperature
 Stationary Frame Total Temperature = 293 [K]
 END
 MASS AND MOMENTUM:
 Mass Flow Rate = 0.0075 [kg s⁻¹]
 Option = Mass Flow Rate
 END
 TURBULENCE:
 Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
 END
 END
 END
 BOUNDARY: R1 Shroud
 Boundary Type = WALL
 Coord Frame = Coord 0
 Frame Type = Rotating
 Location = SHROUD
 BOUNDARY CONDITIONS:
 HEAT TRANSFER:
 Option = Adiabatic
 END
 MASS AND MOMENTUM:
 Option = No Slip Wall
 WALL VELOCITY:
 Option = Counter Rotating Wall

```

    END
  END
  WALL ROUGHNESS:
    Option = Smooth Wall
  END
END
END
BOUNDARY: R1 to R1 Internal Side 1
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = SHROUD TIP GGI SIDE 1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    TURBULENCE:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
BOUNDARY: R1 to R1 Internal Side 2
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = SHROUD TIP GGI SIDE 2
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    TURBULENCE:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
BOUNDARY: R1 to R1 Periodic 1 Side 1

```

```

Boundary Type = INTERFACE
Location = PER1
BOUNDARY CONDITIONS:
  HEAT TRANSFER:
    Option = Conservative Interface Flux
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Conservative Interface Flux
  END
  TURBULENCE:
    Option = Conservative Interface Flux
  END
END
END
BOUNDARY: R1 to R1 Periodic 1 Side 2
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = PER2
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    TURBULENCE:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
BOUNDARY: S1 to R1 Side 2
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = OUTFLOW
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Conservative Interface Flux

```

```

END
TURBULENCE:
    Option = Conservative Interface Flux
END
END
END
DOMAIN MODELS:
    BUOYANCY MODEL:
        Option = Non Buoyant
    END
    DOMAIN MOTION:
        Alternate Rotation Model = true
        Angular Velocity = 20000 [rev min-1]
        Option = Rotating
    AXIS DEFINITION:
        Option = Coordinate Axis
        Rotation Axis = Coord 0.3
    END
END
MESH DEFORMATION:
    Option = None
END
REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 0 [atm]
END
END
FLUID DEFINITION: Air Ideal Gas
    Material = Air Ideal Gas
    Option = Material Library
MORPHOLOGY:
    Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID MODELS:
    COMBUSTION MODEL:
        Option = None
    END
    HEAT TRANSFER MODEL:

```

```

    Option = Total Energy
END
THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
    Option = k epsilon
END
TURBULENT WALL FUNCTIONS:
    High Speed Model = Off
    Option = Scalable
END
END
DOMAIN: S1
    Coord Frame = Coord 0
    Domain Type = Fluid
    Location = solid
BOUNDARY: S1 Default
    Boundary Type = WALL
    Location = Primitive 2D,Primitive 2D A,Primitive 2D B,wall2
BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
        Option = Adiabatic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
        Option = No Slip Wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
        Option = Smooth Wall
    END
END
BOUNDARY: S1 Internal Interface 1 Side 1
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = periodic1
BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:

```

```

    Option = Conservative Interface Flux
END
MASS AND MOMENTUM:
    Option = Conservative Interface Flux
END
TURBULENCE:
    Option = Conservative Interface Flux
END
END
END
BOUNDARY: S1 Internal Interface 1 Side 2
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = periodic
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
        MASS AND MOMENTUM:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
        TURBULENCE:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
BOUNDARY: S1 Outlet
    Boundary Type = OUTLET
    Location = outlet
    BOUNDARY CONDITIONS:
        FLOW REGIME:
            Option = Subsonic
        END
        MASS AND MOMENTUM:
            Option = Average Static Pressure
            Pressure Profile Blend = 0.05
            Relative Pressure = 100700 [Pa]
        END
    PRESSURE AVERAGING:

```

```

    Option = Average Over Whole Outlet
END
END
END
BOUNDARY: S1 to R1 Side 1
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = inlet
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
        MASS AND MOMENTUM:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
        TURBULENCE:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
BOUNDARY: Wall1
    Boundary Type = WALL
    Location = wall1
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Adiabatic
        END
        MASS AND MOMENTUM:
            Option = No Slip Wall
        WALL VELOCITY:
            Angular Velocity = -20000 [rev min-1]
            Option = Rotating Wall
        AXIS DEFINITION:
            Option = Coordinate Axis
            Rotation Axis = Coord 0.3
        END
    END
END
WALL ROUGHNESS:

```

```

    Option = Smooth Wall
END
END
END
DOMAIN MODELS:
  BUOYANCY MODEL:
    Option = Non Buoyant
  END
  DOMAIN MOTION:
    Option = Stationary
  END
  MESH DEFORMATION:
    Option = None
  END
  REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 0 [atm]
  END
END
FLUID DEFINITION: Air Ideal Gas
  Material = Air Ideal Gas
  Option = Material Library
  MORPHOLOGY:
    Option = Continuous Fluid
  END
END
FLUID MODELS:
  COMBUSTION MODEL:
    Option = None
  END
  HEAT TRANSFER MODEL:
    Option = Total Energy
  END
  THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = None
  END
  TURBULENCE MODEL:
    Option = k epsilon
  END

```



```

TURBULENT WALL FUNCTIONS:
  High Speed Model = Off
  Option = Scalable
END
END
END
DOMAIN INTERFACE: R1 to R1 Internal
  Boundary List1 = R1 to R1 Internal Side 1
  Boundary List2 = R1 to R1 Internal Side 2
  Interface Type = Fluid Fluid
INTERFACE MODELS:
  Option = General Connection
FRAME CHANGE:
  Option = None
END
MASS AND MOMENTUM:
  Option = Conservative Interface Flux
MOMENTUM INTERFACE MODEL:
  Option = None
END
END
PITCH CHANGE:
  Option = None
END
END
MESH CONNECTION:
  Option = GGI
END
END
DOMAIN INTERFACE: R1 to R1 Periodic 1
  Boundary List1 = R1 to R1 Periodic 1 Side 1
  Boundary List2 = R1 to R1 Periodic 1 Side 2
  Interface Type = Fluid Fluid
INTERFACE MODELS:
  Option = Rotational Periodicity
AXIS DEFINITION:
  Option = Coordinate Axis
  Rotation Axis = Coord 0.3

```

```

END
END
MESH CONNECTION:
  Option = Automatic
END
END
DOMAIN INTERFACE: S1 Internal Interface 1
  Boundary List1 = S1 Internal Interface 1 Side 1
  Boundary List2 = S1 Internal Interface 1 Side 2
  Interface Type = Fluid Fluid
INTERFACE MODELS:
  Option = Rotational Periodicity
  AXIS DEFINITION:
    Option = Coordinate Axis
    Rotation Axis = Coord 0.3
  END
END
MESH CONNECTION:
  Option = Automatic
END
END
DOMAIN INTERFACE: S1 to R1
  Boundary List1 = S1 to R1 Side 1
  Boundary List2 = S1 to R1 Side 2
  Interface Type = Fluid Fluid
INTERFACE MODELS:
  Option = General Connection
  FRAME CHANGE:
    Option = Stage
  DOWNSTREAM VELOCITY CONSTRAINT:
    Option = Stage Average Velocity
  END
END
PITCH CHANGE:
  Option = Automatic
END
END
MESH CONNECTION:

```

```

    Option = GGI
END
END
OUTPUT CONTROL:
MONITOR OBJECTS:
    EFFICIENCY OUTPUT:
        Inflow Boundary = R1 Inlet
        Option = Output To Solver Monitor
        Outflow Boundary = S1 Outlet
    END
    MONITOR BALANCES:
        Option = Full
    END
    MONITOR FORCES:
        Option = Full
    END
    MONITOR PARTICLES:
        Option = Full
    END
    MONITOR RESIDUALS:
        Option = Full
    END
    MONITOR TOTALS:
        Option = Full
    END
END
RESULTS:
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
END
END
SOLVER CONTROL:
    Turbulence Numerics = High Resolution
ADVECTION SCHEME:
    Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
    Length Scale Option = Conservative

```

Maximum Number of Iterations = 300
 Minimum Number of Iterations = 1
 Timescale Control = Auto Timescale
 Timescale Factor = 1.0
 END

```

+-----+
|                                     |
|                                     |
|               Partitioning         |
|                                     |
|                                     |
+-----+
  
```

```

+-----+
|                                     |
|                                     |
|      ANSYS(R) CFX(R) Partitioner 15.0      |
|                                     |
| Version 2013.10.10-08.49-130242   Thu Oct 10 11:12:50 GMTDT 2023 |
|                                     |
|      Executable Attributes         |
|                                     |
|      single-64bit-int32-supfort-optimised-noprof-lcomp      |
|                                     |
| (C) 2013 ANSYS, Inc.              |
|                                     |
| All rights reserved. Unauthorized use, distribution or duplication |
| is prohibited. This product is subject to U.S. laws governing      |
| export and re-export. For full Legal Notice, see documentation.    |
+-----+
+-----+
|      Job Information at Start of Run      |
+-----+
  
```

Run mode: partitioning run

Host	Mesh	PID	Job Started
	Part	DD/MM/YY	hh:mm:ss
WIN-CG12TBSM04A		1	3376 26/10/23 13:19:22

Memory Allocated for Run (Actual usage may be less)

	Real	Integer	Character	Logical	Double
Mwords	3.06	12.60	3.43	0.12	1.20
Mbytes	11.69	48.06	3.27	0.46	9.16

Host Memory Information (Mbytes)				
Host	System	Allocated	%	
WIN-CG12TBSM04A		16325.57	72.64	0.44

Mesh Statistics

Domain Name : R1

Total Number of Nodes = 230320

Total Number of Elements = 209588

Total Number of Hexahedrons = 209588

Total Number of Faces = 40798

Domain Name : S1

Total Number of Nodes = 98595

Total Number of Elements = 85436

Total Number of Hexahedrons = 85436

Total Number of Faces = 25820

Global Statistics :

Global Number of Nodes = 328915

Global Number of Elements = 295024

Total Number of Hexahedrons = 295024

Global Number of Faces = 66618

Domain Interface Name : R1 to R1 Internal

Discretization type = GGI

Intersection type = Direct

Non-overlap area fraction on side 1 = 7.67E-03

Non-overlap area fraction on side 2 = 7.70E-03

Domain Interface Name : R1 to R1 Periodic 1

Discretization type = 1:1

Domain Interface Name : S1 Internal Interface 1

Discretization type = GGI

Intersection type = Direct

Non-overlap area fraction on side 1 = 2.40E-03

Non-overlap area fraction on side 2 = 2.46E-03

Domain Interface Name : S1 to R1

Discretization type	=	GGI
Intersection type	=	Direct
Non-overlap area fraction on side 1	=	2.86E-07
Non-overlap area fraction on side 2	=	3.21E-07
Pitch ratio (area side 1 / area side 2)	=	1.000
Pitch angle for side 1 [degrees]	=	30.671
Pitch angle for side 2 [degrees]	=	30.000
Number of stage groups	=	16

```

+-----+
|           Vertex Based Partitioning           |
+-----+

```

Partitioning of domain: R1

- Partitioning tool: MeTiS multilevel k-way algorithm
- Number of partitions: 2
- Number of graph-nodes: 225385
- Number of graph-edges: 1320402

Partitioning of domain: S1

- Partitioning tool: MeTiS multilevel k-way algorithm
- Number of partitions: 2
- Number of graph-nodes: 98595
- Number of graph-edges: 564752

```

+-----+
|           Partitioning Information           |
+-----+

```

Partitioning information for domain: R1

```

+-----+-----+-----+
| Elements | Vertices | Faces |
+-----+-----+-----+

```

Part	Number	%		Number	%	%Ovlp		Number	%	
+-----+-----+-----+-----+										
Full	209588			230320			40798			
+-----+-----+-----+-----+										
1	107084	50.7		118444	50.6	1.7		20406	49.6	
2	104323	49.3		115862	49.4	1.7		20770	50.4	
+-----+-----+-----+-----+										
Min	104323	49.3		115862	49.4	1.7		20406	49.6	
(part)	(2)			(2 1)			(1)			
+-----+-----+-----+-----+										
Max	107084	50.7		118444	50.6	1.7		20770	50.4	
(part)	(1)			(1 2)			(2)			
+-----+-----+-----+-----+										
Ave	105704	50.0		117153	50.0	1.7		20588	50.0	
+-----+-----+-----+-----+										
Sum	211407	100.0		234306	100.0	1.7		41176	100.0	
+-----+-----+-----+-----+										

Partitioning information for domain: S1

+-----+-----+-----+-----+										
	Elements			Vertices			Faces			
+-----+-----+-----+-----+										
Part	Number	%		Number	%	%Ovlp		Number	%	
+-----+-----+-----+-----+										
Full	85436			98595			25820			
+-----+-----+-----+-----+										
1	46699	53.9		51442	50.9	2.4		8124	31.2	
2	39881	46.1		49616	49.1	2.5		17942	68.8	
+-----+-----+-----+-----+										
Min	39881	46.1		49616	49.1	2.5		8124	31.2	
(part)	(2)			(2 1)			(1)			
+-----+-----+-----+-----+										
Max	46699	53.9		51442	50.9	2.4		17942	68.8	
(part)	(1)			(1 2)			(2)			
+-----+-----+-----+-----+										
Ave	43290	50.0		50529	50.0	2.4		13033	50.0	
+-----+-----+-----+-----+										

Sum	86580	100.0		101058	100.0	2.4		26066	100.0	
+-----+-----+-----+-----+										

+-----+										
Partitioning CPU-Time Requirements										
+-----+										

- Preparations	2.020E-01 seconds
- Low-level mesh partitioning	1.100E-01 seconds
- Gather zone interface information	0.000E+00 seconds
- Global partitioning information	0.000E+00 seconds
- Element and face partitioning information	1.500E-02 seconds
- Vertex partitioning information	0.000E+00 seconds
- Partitioning information compression	0.000E+00 seconds
- Summed CPU-time for mesh partitioning	3.430E-01 seconds

+-----+										
Job Information at End of Run										
+-----+										

+-----+										
Host	Mesh	Job Finished		CPU						
	Part	DD/MM/YY		hh:mm:ss		seconds				
+-----+										
WIN-CG12TBSM04A		1		26/10/15		13:19:23		9.820E-01		
+-----+										

Total wall clock time: 9.830E-01 seconds
or: (0: 0: 0: 0.983)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

+-----+										
	Solver									
+-----+										

```

+-----+
|
|          ANSYS(R) CFX(R) Solver 15.0          |
|
| Version 2013.10.10-08.49-130242   Thu Oct 10 11:12:50 GMTDT 2013 |
|
|          Executable Attributes          |
|
|    single-64bit-int32-supfort-optimised-noprof-lcomp    |
|
| (C) 2013 ANSYS, Inc.          |
|
| All rights reserved. Unauthorized use, distribution or duplication |
| is prohibited. This product is subject to U.S. laws governing    |
| export and re-export. For full Legal Notice, see documentation.  |
+-----+

```

```

+-----+
|          Job Information at Start of Run          |
+-----+

```

Run mode: parallel run (Platform MPI)

```

+-----+-----+-----+-----+-----+
| Host          | Mesh | PID | Job Started |
|               | Part |    | DD/MM/YY | hh:mm:ss |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| WIN-CG12TBSM04A | 1 | 4544 | 26/10/24 | 13:19:24 |
|               | 2 | 4620 | 26/10/24 | 13:19:24 |
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

+-----+
|               License Information               |
+-----+

```

License Cap: ANSYS CFX Solver (Max 512K Nodes)
License Cap: Multiple Reference Frames
License Cap: Parallel
License ID: WIN-CG12TBSM04A-PC-3300-008434

```

+-----+
|   Memory Allocated for Run (Actual usage may be less)   |
+-----+

```

Allocated storage in: Mwords
Mbytes

Partition	Real	Integer	Character	Logical	Double
Minimum	52.98	12.53	3.88	0.12	1.21
(1)	202.10	47.78	3.70	0.11	9.22
Maximum	59.61	13.12	3.88	0.12	1.21
(2)	227.40	50.06	3.70	0.11	9.22
Average	56.30	12.82	3.88	0.12	1.21
	214.75	48.92	3.70	0.11	9.22
Total	112.59	25.65	7.77	0.24	2.42
	429.50	97.84	7.41	0.23	18.43

Domain Name : R1

Total Number of Nodes = 230320

Total Number of Elements = 209588

Total Number of Hexahedrons = 209588

Total Number of Faces = 40798

Domain Name : S1

Total Number of Nodes = 98595

Total Number of Elements = 85436

Total Number of Hexahedrons = 85436

Total Number of Faces = 25820

Global Statistics :

Global Number of Nodes = 328915

Global Number of Elements = 295024

Total Number of Hexahedrons = 295024

Global Number of Faces = 66618

Domain Interface Name : R1 to R1 Internal

Discretization type = GGI

Intersection type = Partitioner

Non-overlap area fraction on side 1 = 7.66E-03

Non-overlap area fraction on side 2 = 7.70E-03

Domain Interface Name : R1 to R1 Periodic 1

Discretization type = 1:1

Domain Interface Name : S1 Internal Interface 1

Discretization type = GGI

Intersection type = Partitioner

Non-overlap area fraction on side 1 = 2.40E-03

Non-overlap area fraction on side 2 = 2.46E-03

Domain Interface Name : S1 to R1

Discretization type = GGI
Intersection type = Partitioner
Non-overlap area fraction on side 1 = 2.86E-07
Non-overlap area fraction on side 2 = 3.21E-07
Pitch ratio (area side 1 / area side 2) = 1.000
Pitch angle for side 1 [degrees] = 30.671
Pitch angle for side 2 [degrees] = 30.000
Number of stage groups = 16

+-----+
| Average Scale Information |
+-----+

Domain Name : R1

Global Length = 1.3400E-02
Minimum Extent = 2.4460E-02
Maximum Extent = 3.7180E-02
Density = 1.1971E+00
Dynamic Viscosity = 1.0943E-05
Velocity = 1.2327E+02
Advection Time = 1.0871E-04
Reynolds Number = 1.8071E+05
Speed of Sound = 3.4372E+02
Mach Number = 3.5863E-01
Thermal Conductivity = 2.6100E-02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 9.9691E+02
Specific Heat Capacity at Constant Volume = 7.0981E+02
Specific Heat Ratio = 1.4045E+00
Prandtl Number = 4.1796E-01

Domain Name : S1

Global Length = 1.7793E-02
Minimum Extent = 1.1000E-02
Maximum Extent = 6.2801E-02

Density	= 1.1971E+00
Dynamic Viscosity	= 1.0943E-05
Velocity	= 1.1042E+02
Advection Time	= 1.6114E-04
Reynolds Number	= 2.1493E+05
Speed of Sound	= 3.4372E+02
Mach Number	= 3.2125E-01
Thermal Conductivity	= 2.6100E-02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	= 9.9691E+02
Specific Heat Capacity at Constant Volume	= 7.0981E+02
Specific Heat Ratio	= 1.4045E+00
Prandtl Number	= 4.1796E-01

```

+-----+
|           Checking for Isolated Fluid Regions           |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Equations are given two labels: the individual name and a combined name used for combining residuals together. Residuals for multidomain problems are combined provided the domains are connected together and have the same domain type (solid or fluid/porous). If there are multiple groups of the same domain type, then the group residual is identified by the name of the first domain in the connected group.

The individual and combined equation names are given below.

Subsystem : Momentum and Mass

U-Mom-R1	--> U-Mom
V-Mom-R1	--> V-Mom
W-Mom-R1	--> W-Mom
P-Mass-R1	--> P-Mass

U-Mom-S1	--> U-Mom
V-Mom-S1	--> V-Mom
W-Mom-S1	--> W-Mom
P-Mass-S1	--> P-Mass

Subsystem : Heat Transfer

H-Energy-R1	--> H-Energy
H-Energy-S1	--> H-Energy

Subsystem : TurbKE and Diss.K

K-TurbKE-R1	--> K-TurbKE
E-Diss.K-R1	--> E-Diss.K
K-TurbKE-S1	--> K-TurbKE
E-Diss.K-S1	--> E-Diss.K

CFD Solver started: Mon Oct 26 13:19:27 2015

```

+-----+
|               Convergence History               |
+-----+
```

```

=====
=====
```

Timescale Information			
Equation	Type	Timescale	
U-Mom-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
V-Mom-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
W-Mom-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
P-Mass-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
U-Mom-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
V-Mom-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
W-Mom-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	

P-Mass-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
+-----+	+-----+	+-----+	
H-Energy-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
H-Energy-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
+-----+	+-----+	+-----+	
K-TurbKE-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
E-Diss.K-R1	Auto Timescale	3.22646E-05	
K-TurbKE-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
E-Diss.K-S1	Auto Timescale	3.22646E-05	
+-----+	+-----+	+-----+	

```
=====
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 1 CPU SECONDS = 6.894E+00

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	
U-Mom	0.00	3.2E-03	1.4E-01	1.2E-01	ok
V-Mom	0.00	1.5E-02	3.7E-01	3.0E-02	OK
W-Mom	0.00	9.7E-04	1.2E-02	7.9E+00	ok
P-Mass	0.00	2.3E-02	1.4E-01	9.4 1.4E-02	OK
+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	
H-Energy	0.00	2.5E-02	6.5E-01	5.9 8.1E-03	OK
+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	
K-TurbKE	0.00	7.0E-02	2.7E-01	5.9 7.9E-03	OK
E-Diss.K	0.00	1.2E-01	9.8E-01	7.2 6.4E-03	OK
+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	

```
=====
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 2 CPU SECONDS = 1.866E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	
U-Mom	4.45	1.4E-02	2.0E-01	9.7E-02	OK
V-Mom	0.60	9.2E-03	1.4E-01	8.2E-02	OK

W-Mom	99.99	1.0E-01	6.4E-01	5.8E-02	OK
P-Mass	0.29	6.6E-03	9.2E-02	5.2	9.4E-02 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					
H-Energy	1.05	2.6E-02	6.8E-01	5.8	5.8E-02 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					
K-TurbKE	0.69	4.8E-02	4.1E-01	5.8	1.2E-02 OK
E-Diss.K	0.34	3.9E-02	9.4E-01	7.3	5.3E-03 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 3 CPU SECONDS = 2.923E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
+-----+-----+-----+-----+-----+					
U-Mom	1.17	1.7E-02	2.0E-01	1.6E-02	OK
V-Mom	1.36	1.3E-02	1.4E-01	1.2E-02	OK
W-Mom	1.79	1.8E-01	1.4E+00	1.9E-02	OK
P-Mass	0.34	2.2E-03	4.6E-02	9.4	4.9E-02 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					
H-Energy	0.62	1.6E-02	3.5E-01	5.8	8.2E-02 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					
K-TurbKE	0.59	2.8E-02	3.6E-01	5.8	6.8E-03 OK
E-Diss.K	0.60	2.4E-02	4.3E-01	7.6	9.6E-04 OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 4 CPU SECONDS = 4.000E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
+-----+-----+-----+-----+-----+					
U-Mom	1.64	2.8E-02	4.5E-01	3.9E-02	OK
V-Mom	0.61	7.7E-03	1.3E-01	5.0E-02	OK
W-Mom	1.19	2.1E-01	1.5E+00	3.3E-02	OK
P-Mass	0.69	1.5E-03	3.4E-02	5.2	9.1E-02 OK

```

+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
|          ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 90.0% of the faces, 90.0% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: S1 Outlet. |
| The fluid name is: Air Ideal Gas. |
| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |
+-----+
| H-Energy      | 1.40 | 2.3E-02 | 5.0E-01 | 5.8 7.1E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE      | 0.89 | 2.5E-02 | 2.6E-01 | 5.8 5.8E-03 OK|
| E-Diss.K      | 0.89 | 2.1E-02 | 7.7E-01 | 7.6 1.5E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

OUTER LOOP ITERATION = 5 CPU SECONDS = 5.045E+01

```

+-----+
| Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom         | 0.66 | 1.8E-02 | 3.4E-01 | 3.9E-02 OK|
| V-Mom         | 0.68 | 5.2E-03 | 1.2E-01 | 7.2E-02 OK|
| W-Mom         | 0.38 | 8.1E-02 | 5.9E-01 | 4.8E-02 OK|
| P-Mass        | 0.73 | 1.1E-03 | 3.5E-02 | 5.2 7.8E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
|          ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 100.0% of the faces, 100.0% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: S1 Outlet. |
| The fluid name is: Air Ideal Gas. |
| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |

```

```

+-----+
| H-Energy      | 0.65 | 1.5E-02 | 3.1E-01 | 5.8 5.0E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE      | 0.87 | 2.2E-02 | 2.2E-01 | 5.7 1.4E-02 OK|
| E-Diss.K      | 1.19 | 2.5E-02 | 4.5E-01 | 7.6 1.9E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

```

|               Timescale Information               |
+-----+-----+-----+
| Equation      | Type      | Timescale |
+-----+-----+-----+
| U-Mom-R1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| V-Mom-R1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| W-Mom-R1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| P-Mass-R1     | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| U-Mom-S1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| V-Mom-S1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| W-Mom-S1      | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| P-Mass-S1     | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
+-----+-----+-----+
| H-Energy-R1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| H-Energy-S1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
+-----+-----+-----+
| K-TurbKE-R1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| E-Diss.K-R1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| K-TurbKE-S1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
| E-Diss.K-S1   | Auto Timescale | 3.34470E-05 |
+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

```

OUTER LOOP ITERATION = 6          CPU SECONDS = 6.096E+01

```

```

+-----+
| Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |

```

```

+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom      | 0.61 | 1.1E-02 | 1.5E-01 | 1.5E-02 OK|
| V-Mom      | 0.85 | 4.4E-03 | 1.8E-01 | 3.6E-02 OK|
| W-Mom      | 0.40 | 3.3E-02 | 3.7E-01 | 2.1E-02 OK|
| P-Mass     | 0.43 | 4.8E-04 | 1.1E-02 | 9.4 3.8E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
|          ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 100.0% of the faces, 100.0% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain.          |
| The boundary condition name is: S1 Outlet.          |
| The fluid name is: Air Ideal Gas.          |
| If this situation persists, consider switching          |
| to an Opening type boundary condition instead.          |
+-----+-----+
| H-Energy    | 0.86 | 1.2E-02 | 3.0E-01 | 5.8 2.5E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE    | 0.46 | 1.0E-02 | 1.2E-01 | 5.7 2.8E-02 OK|
| E-Diss.K    | 0.56 | 1.4E-02 | 5.2E-01 | 7.6 1.1E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

OUTER LOOP ITERATION = 7 CPU SECONDS = 7.182E+01

```

+-----+
| Equation    | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom      | 0.75 | 8.3E-03 | 1.4E-01 | 1.1E-02 OK|
| V-Mom      | 0.90 | 4.0E-03 | 1.6E-01 | 2.1E-02 OK|
| W-Mom      | 1.19 | 3.9E-02 | 3.8E-01 | 1.7E-02 OK|
| P-Mass     | 0.44 | 2.1E-04 | 1.1E-02 | 9.4 6.2E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
|          ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 96.8% of the faces, 97.0% of the area) |

```

	to prevent fluid from flowing into the domain.	
	The boundary condition name is: S1 Outlet.	
	The fluid name is: Air Ideal Gas.	
	If this situation persists, consider switching	
	to an Opening type boundary condition instead.	

H-Energy	0.74	9.2E-03	2.1E-01	5.8	2.4E-02	OK
----------	------	---------	---------	-----	---------	----

K-TurbKE	1.33	1.3E-02	1.7E-01	5.7	2.1E-02	OK
E-Diss.K	1.38	1.9E-02	3.8E-01	7.6	1.0E-02	OK

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 8 CPU SECONDS = 8.259E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.59	5.0E-03	1.5E-01	1.3E-02 OK
V-Mom	0.67	2.7E-03	1.5E-01	1.9E-02 OK
W-Mom	0.58	2.2E-02	7.8E-01	1.4E-02 OK
P-Mass	1.19	2.5E-04	1.8E-02	9.4 7.8E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET	
boundary condition (at 6.0% of the faces, 6.2% of the area)	
to prevent fluid from flowing into the domain.	
The boundary condition name is: S1 Outlet.	
The fluid name is: Air Ideal Gas.	
If this situation persists, consider switching	
to an Opening type boundary condition instead.	

H-Energy	0.80	7.4E-03	1.5E-01	5.8	4.4E-02	OK
----------	------	---------	---------	-----	---------	----

K-TurbKE	1.57	2.1E-02	2.6E-01	5.7	2.3E-02	OK
E-Diss.K	1.28	2.5E-02	3.0E-01	7.6	9.6E-03	OK

+-----+-----+-----+-----+-----+

=====

OUTER LOOP ITERATION = 9 CPU SECONDS = 9.341E+01

```
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom    | 1.00 | 5.0E-03 | 1.1E-01 | 6.9E-02 OK|
| V-Mom    | 0.99 | 2.6E-03 | 1.1E-01 | 9.1E-02 OK|
| W-Mom    | 19.92 | 4.5E-01 | 1.7E+01 | 8.0E-03 OK|
| P-Mass   | 8.03 | 2.0E-03 | 6.3E-02 | 5.2 2.5E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
| ***** Notice ***** |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 6.1% of the faces, 6.4% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: S1 Outlet. |
| The fluid name is: Air Ideal Gas. |
| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |
+-----+
| H-Energy | 0.89 | 6.6E-03 | 1.1E-01 | 5.8 7.3E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE | 1.11 | 2.3E-02 | 2.7E-01 | 5.7 1.3E-02 OK|
| E-Diss.K | 0.68 | 1.7E-02 | 3.9E-01 | 7.6 5.1E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
```

=====

OUTER LOOP ITERATION = 10 CPU SECONDS = 1.039E+02

```
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom    | 0.94 | 4.7E-03 | 1.6E-01 | 9.5E-03 OK|
```

V-Mom	0.92	2.4E-03	1.2E-01	2.0E-02	OK
W-Mom	0.02	9.9E-03	3.2E-01	8.5E-03	OK
P-Mass	0.21	4.4E-04	2.9E-02	9.4	6.1E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 8.0% of the faces, 8.3% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.

The boundary condition name is: S1 Outlet.

The fluid name is: Air Ideal Gas.

If this situation persists, consider switching to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.95	6.3E-03	9.5E-02	5.8	9.7E-02 OK
K-TurbKE	0.80	1.8E-02	5.7E-01	5.7	1.3E-02 OK
E-Diss.K	0.64	1.1E-02	2.9E-01	7.6	3.4E-03 OK

=====

=====

Timescale Information			
Equation	Type	Timescale	
U-Mom-R1	Auto Timescale	3.31680E-05	
V-Mom-R1	Auto Timescale	3.31680E-05	
W-Mom-R1	Auto Timescale	3.31680E-05	
P-Mass-R1	Auto Timescale	3.31680E-05	
U-Mom-S1	Auto Timescale	3.31680E-05	
V-Mom-S1	Auto Timescale	3.31680E-05	
W-Mom-S1	Auto Timescale	3.31680E-05	
P-Mass-S1	Auto Timescale	3.31680E-05	
H-Energy-R1	Auto Timescale	3.31680E-05	
H-Energy-S1	Auto Timescale	3.31680E-05	

K-TurbKE-R1	Auto Timescale	3.31680E-05
E-Diss.K-R1	Auto Timescale	3.31680E-05
K-TurbKE-S1	Auto Timescale	3.31680E-05
E-Diss.K-S1	Auto Timescale	3.31680E-05

This run of the CFX-15.0 Solver started at 13:19:21 on 26 Oct 2015 by user PC on WIN-CG12TBSM04A (intel_xeon64.sse2_winnt) using the command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v150\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch
-ccl runInput.ccl -fullname CFX_002
```

Point Releases and Patches installed:

- ANSYS, Inc. Products 15.0
- ANSYS Mechanical Products 15.0
- ANSYS Customization Files 15.0
- ANSYS Autodyn 15.0
- ANSYS LS-DYNA 15.0
- ANSYS CFX (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
- ANSYS Fluent (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
- ANSYS TurboGrid 15.0
- ANSYS Polyflow (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
- ANSYS CFD-Post only 15.0
- ANSYS Aqwa 15.0
- ANSYS ICEM CFD 15.0
- ANSYS Icepak (includes ANSYS CFD-Post) 15.0
- ANSYS Remote Solve Manager Standalone Services 15.0
- ANSYS, Inc. License Manager 15.0

Setting up CFX Solver run ...

CFX Command Language for Run

+-----+

LIBRARY:

MATERIAL:diffuse model of the smoke pipe

Material Description = diffuse model of the smoke pipe
(constant Cp)

Material Group = Air Data

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

=====

OUTER LOOP ITERATION = 11

CPU SECONDS = 1.146E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.90	4.2E-03	1.5E-01	9.3E-03 OK
V-Mom	0.95	2.3E-03	1.1E-01	1.7E-02 OK
W-Mom	0.68	6.7E-03	3.3E-01	1.9E-02 OK
P-Mass	0.34	1.5E-04	7.7E-03	9.4 9.4E-02 OK

***** Notice *****

| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |

| boundary condition (at 6.3% of the faces, 6.5% of the area) |

| to prevent fluid from flowing into the domain. |

| The boundary condition name is: S1 Outlet. |

| The fluid name is: Air Ideal Gas. |

| If this situation persists, consider switching |

```

| to an Opening type boundary condition instead. |
+-----+
| H-Energy      | 0.94 | 5.9E-03 | 8.6E-02 | 10.5 1.2E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE      | 0.69 | 1.3E-02 | 2.4E-01 | 5.7 1.6E-02 OK|
| E-Diss.K      | 0.84 | 9.1E-03 | 3.7E-01 | 7.6 6.0E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+

+-----+
|           An error has occurred in cfx5solve:           |
|                                                         |
| The ANSYS CFX solver exited with return code 1. No results file |
| has been created.                                         |
+-----+

```

End of solution stage.

```

+-----+
| The following user files have been saved in the directory |
| F:/Bondarenko/blad_pending_tasks/dp0_CFX_Solution/CFX_002: |
|                                                         |
| mon                                                         |
+-----+

```

```

+-----+
|           Warning!                                       |
|                                                         |
| After waiting for 60 seconds, 1 solver manager process(es) appear |
| not to have noticed that this run has ended. You may get errors |
| removing some files if they are still open in the solver manager. |
+-----+

```

This run of the ANSYS CFX Solver has finished.

*Фрагмент кода
модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере с учетом
турбулентных эффектов и наличия препятствий программном
комплексе ANSYS Fluent*

This run of the Fluent-R2019.0 Solver started at 09:22:09 on 19 Sept 2023 by user PC on WIN-CG12TBSM04A (intel_xeon64.sse2_winnt) using the command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v190\CFX\bin\perl\lib\flnt5solve.pl" -batch  
-ccl runInput.ccl -fullname CFX_002
```

Point Releases and Patches installed:

ANSYS Fluent (includes ANSYS CFD-Post) R2019
ANSYS TurboGrid R2019
ANSYS Polyflow (includes ANSYS CFD-Post) R2019
ANSYS CFD-Post only R2019
ANSYS Aqwa R2019
ANSYS ICEM CFD R2019
ANSYS Icepak (includes ANSYS CFD-Post) R2019
ANSYS Remote Solve Manager Standalone Services R2019
ANSYS, Inc. License Manager R2019

Setting up Fluent run ...

```
=====
```

```
=====
```

```
OUTER LOOP ITERATION = 1150          CPU SECONDS = 1.470E+02
```

```
-----
```

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	1.14	4.0E-03	1.1E-01	1.3E-02 OK
V-Mom	0.99	1.9E-03	8.0E-02	1.3E-02 OK
W-Mom	0.89	4.3E-03	2.2E-01	1.9E-02 OK

P-Mass	0.93	8.8E-05	4.7E-03	9.4	8.5E-02	OK
--------	------	---------	---------	-----	---------	----

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 9.4% of the faces, 9.5% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.
The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

If this situation persists, consider switching to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.92	4.4E-03	9.5E-02	5.7	9.5E-02	OK
K-TurbKE	0.78	5.0E-03	1.3E-01	5.7	6.5E-03	OK
E-Diss.K	1.20	6.6E-03	2.5E-01	7.6	3.9E-03	OK

OUTER LOOP ITERATION = 1 CPU SECONDS = 1.577E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.98	3.9E-03	1.1E-01	1.3E-02 OK
V-Mom	1.00	1.9E-03	7.3E-02	1.4E-02 OK
W-Mom	0.81	3.5E-03	1.4E-01	2.0E-02 OK
P-Mass	1.01	8.9E-05	4.6E-03	9.4 8.7E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 11.5% of the faces, 11.4% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.

```

|   The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
|
|   If this situation persists, consider switching
|   to an Opening type boundary condition instead.
+-----+
| H-Energy      | 0.95 | 4.2E-03 | 8.6E-02 | 5.7 7.5E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE      | 0.83 | 4.1E-03 | 1.1E-01 | 5.7 5.6E-03 OK|
| E-Diss.K      | 1.03 | 6.8E-03 | 2.6E-01 | 7.6 3.8E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

Timescale Information			
Equation	Type	Timescale	
U-Mom-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
V-Mom-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
W-Mom-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
P-Mass-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
U-Mom-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
V-Mom-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
W-Mom-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
P-Mass-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
H-Energy-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
H-Energy-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
K-TurbKE-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
E-Diss.K-R1	Auto Timescale	3.12538E-05	
K-TurbKE-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	
E-Diss.K-S1	Auto Timescale	3.12538E-05	

```
=====
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 2 CPU SECONDS = 1.684E+02

```
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom    | 0.89 | 3.5E-03 | 9.6E-02 | 1.3E-02 OK|
| V-Mom    | 1.04 | 1.9E-03 | 6.3E-02 | 1.3E-02 OK|
| W-Mom    | 0.87 | 3.0E-03 | 8.5E-02 | 2.5E-02 OK|
| P-Mass    | 0.96 | 8.6E-05 | 4.2E-03 | 9.4 9.2E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
```

```
| ***** Notice ***** |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 11.9% of the faces, 11.5% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: S1 Outlet. |
| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
```

```
| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |
```

```
-----+
| H-Energy | 0.93 | 3.9E-03 | 7.6E-02 | 5.7 4.9E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE | 0.89 | 3.7E-03 | 9.8E-02 | 5.7 4.8E-03 OK|
| E-Diss.K | 0.80 | 5.4E-03 | 1.7E-01 | 7.6 3.7E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
```

```
=====
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 3 CPU SECONDS = 1.792E+02

```
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom    | 0.89 | 3.1E-03 | 7.7E-02 | 4.9E-03 OK|
| V-Mom    | 1.07 | 2.1E-03 | 5.3E-02 | 5.9E-03 OK|
```

W-Mom	0.91	2.8E-03	8.0E-02	1.4E-02	OK
P-Mass	0.92	7.9E-05	3.2E-03	13.7	5.0E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 15.2% of the faces, 14.5% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.
The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

If this situation persists, consider switching to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.94	3.6E-03	1.0E-01	5.7	3.4E-02 OK
K-TurbKE	0.82	3.0E-03	8.1E-02	5.7	5.4E-03 OK
E-Diss.K	0.84	4.5E-03	1.0E-01	7.6	4.7E-03 OK

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 4 CPU SECONDS = 1.904E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	1.01	3.1E-03	8.3E-02	5.1E-03 OK
V-Mom	1.06	2.2E-03	5.3E-02	5.7E-03 OK
W-Mom	0.86	2.4E-03	5.6E-02	1.5E-02 OK
P-Mass	0.97	7.7E-05	3.9E-03	13.7 5.1E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 19.4% of the faces, 18.6% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.

| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

| If this situation persists, consider switching
| to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.96	3.5E-03	1.2E-01	5.7	2.5E-02	OK
K-TurbKE	0.90	2.7E-03	6.7E-02	5.7	6.3E-03	OK
E-Diss.K	1.03	4.7E-03	1.0E-01	7.6	6.3E-03	OK

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 5 CPU SECONDS = 2.015E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	1.32	4.1E-03	8.5E-02	5.3E-03 OK
V-Mom	1.04	2.3E-03	4.8E-02	5.9E-03 OK
W-Mom	0.85	2.0E-03	3.8E-02	1.5E-02 OK
P-Mass	1.03	7.9E-05	5.4E-03	13.7 5.2E-02 OK

***** Notice *****

| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET
| boundary condition (at 24.5% of the faces, 23.4% of the area)
| to prevent fluid from flowing into the domain.
| The boundary condition name is: S1 Outlet.

| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

| If this situation persists, consider switching
| to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.95	3.3E-03	1.0E-01	5.7	2.1E-02	OK
K-TurbKE	0.96	2.6E-03	5.5E-02	5.7	6.8E-03	OK
E-Diss.K	1.13	5.3E-03	1.2E-01	7.6	7.3E-03	OK


```

+-----+-----+-----+-----+-----+
=====
=====
OUTER LOOP ITERATION = 6          CPU SECONDS = 2.126E+02
-----
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom    | 1.34 | 5.5E-03 | 6.9E-02 | 5.5E-03 OK|
| V-Mom    | 1.03 | 2.3E-03 | 5.3E-02 | 6.0E-03 OK|
| W-Mom    | 0.88 | 1.8E-03 | 3.0E-02 | 1.6E-02 OK|
| P-Mass    | 1.10 | 8.7E-05 | 8.0E-03 | 13.7 5.0E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
|          ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 29.1% of the faces, 27.8% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain.          |
| The boundary condition name is: S1 Outlet.          |
| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
|
| If this situation persists, consider switching          |
| to an Opening type boundary condition instead.          |
+-----+-----+
| H-Energy | 0.91 | 3.0E-03 | 9.7E-02 | 5.7 2.3E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE | 0.96 | 2.5E-03 | 3.7E-02 | 5.7 7.6E-03 OK|
| E-Diss.K | 0.99 | 5.2E-03 | 1.2E-01 | 7.5 7.4E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

=====
=====
|          Timescale Information          |
-----
| Equation | Type | Timescale |
+-----+-----+-----+

```

U-Mom-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
V-Mom-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
W-Mom-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
P-Mass-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
U-Mom-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
V-Mom-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
W-Mom-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
P-Mass-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
+-----+-----+-----+			
H-Energy-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
H-Energy-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
+-----+-----+-----+			
K-TurbKE-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
E-Diss.K-R1	Auto Timescale	3.04927E-05	
K-TurbKE-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
E-Diss.K-S1	Auto Timescale	3.04927E-05	
+-----+-----+-----+			

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 7 CPU SECONDS = 2.236E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
+-----+-----+-----+-----+-----+					
U-Mom	0.82	4.5E-03	4.8E-02	1.7E-02	OK
V-Mom	0.95	2.2E-03	6.1E-02	1.5E-02	OK
W-Mom	0.91	1.6E-03	3.6E-02	3.3E-02	OK
P-Mass	1.05	9.2E-05	6.2E-03	9.4 9.7E-02	OK
+-----+-----+-----+-----+-----+					

	***** Notice *****	
	A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET	
	boundary condition (at 33.5% of the faces, 32.1% of the area)	
	to prevent fluid from flowing into the domain.	
	The boundary condition name is: S1 Outlet.	
	The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers	

```

| If this situation persists, consider switching          |
| to an Opening type boundary condition instead.          |
+-----+
| H-Energy          | 0.89 | 2.7E-03 | 8.6E-02 | 5.7 2.8E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE          | 1.00 | 2.5E-03 | 3.9E-02 | 5.7 7.8E-03 OK|
| E-Diss.K          | 0.97 | 5.1E-03 | 1.2E-01 | 7.5 6.7E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

```

OUTER LOOP ITERATION = 8          CPU SECONDS = 2.342E+02

```

```

-----
| Equation          | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom            | 0.74 | 3.4E-03 | 2.9E-02 | 6.3E-03 OK|
| V-Mom            | 0.94 | 2.1E-03 | 7.0E-02 | 7.4E-03 OK|
| W-Mom            | 0.90 | 1.5E-03 | 4.1E-02 | 2.0E-02 OK|
| P-Mass           | 1.04 | 9.5E-05 | 6.8E-03 | 13.7 5.3E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

| ***** Notice *****          |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 37.4% of the faces, 35.9% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain.              |
| The boundary condition name is: S1 Outlet.                  |
| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

```

```

| If this situation persists, consider switching          |
| to an Opening type boundary condition instead.          |
+-----+
| H-Energy          | 0.88 | 2.4E-03 | 5.5E-02 | 5.7 3.6E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE          | 1.06 | 2.6E-03 | 3.8E-02 | 5.7 7.8E-03 OK|
| E-Diss.K          | 1.08 | 5.5E-03 | 1.4E-01 | 7.5 6.6E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 9

CPU SECONDS = 2.453E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.70	2.4E-03	2.9E-02	7.7E-03 OK
V-Mom	0.96	2.0E-03	6.5E-02	8.6E-03 OK
W-Mom	0.90	1.3E-03	3.0E-02	2.2E-02 OK
P-Mass	0.97	9.3E-05	6.9E-03	13.7 6.2E-02 OK

***** Notice *****

| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 41.0% of the faces, 39.5% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: S1 Outlet. |
| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |

H-Energy	0.93	2.2E-03	5.9E-02	5.7 4.2E-02 OK
K-TurbKE	1.05	2.8E-03	3.7E-02	5.7 7.9E-03 OK
E-Diss.K	1.19	6.5E-03	2.1E-01	7.5 7.4E-03 OK

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 10

CPU SECONDS = 2.564E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.67	1.6E-03	2.4E-02	9.5E-03 OK
V-Mom	0.93	1.9E-03	7.0E-02	1.0E-02 OK

W-Mom	0.87	1.1E-03	2.9E-02	2.5E-02	OK
P-Mass	0.90	8.3E-05	5.9E-03	13.7	7.5E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 44.0% of the faces, 42.4% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.
The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers

If this situation persists, consider switching to an Opening type boundary condition instead.

H-Energy	0.95	2.1E-03	6.3E-02	5.7	4.6E-02 OK
K-TurbKE	1.03	2.8E-03	4.8E-02	5.7	7.5E-03 OK
E-Diss.K	1.05	6.8E-03	2.5E-01	7.5	7.4E-03 OK

OUTER LOOP ITERATION = 11 CPU SECONDS = 2.674E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.78	1.2E-03	2.5E-02	1.1E-02 OK
V-Mom	0.92	1.7E-03	7.0E-02	1.2E-02 OK
W-Mom	0.86	9.7E-04	2.1E-02	2.6E-02 OK
P-Mass	0.83	6.9E-05	4.0E-03	13.7 8.9E-02 OK

***** Notice *****

A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition (at 45.2% of the faces, 43.6% of the area) to prevent fluid from flowing into the domain.
The boundary condition name is: S1 Outlet.

```

|   The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
|
|   If this situation persists, consider switching
|   to an Opening type boundary condition instead.
+-----+
| H-Energy      | 0.98 | 2.1E-03 | 7.2E-02 | 5.7 4.7E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE      | 1.01 | 2.9E-03 | 5.8E-02 | 5.7 7.2E-03 OK|
| E-Diss.K      | 1.03 | 7.1E-03 | 2.5E-01 | 7.5 7.0E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

=====
=====

```

```

OUTER LOOP ITERATION = 12          CPU SECONDS = 2.785E+02

```

```

+-----+
|   Equation    | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom         | 1.19 | 1.5E-03 | 2.8E-02 | 6.9E-03 OK|
| V-Mom         | 0.93 | 1.6E-03 | 6.8E-02 | 6.8E-03 OK|
| W-Mom         | 0.87 | 8.4E-04 | 1.8E-02 | 1.5E-02 OK|
| P-Mass        | 0.84 | 5.8E-05 | 2.3E-03 | 17.9 5.2E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

```

+-----+
|           ***** Notice *****           |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 46.6% of the faces, 45.0% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain.              |
| The boundary condition name is: S1 Outlet.                  |
|   The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
|

```

```

+-----+
|           ***** Notice *****           |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET          |
| boundary condition (at 34.8% of the faces, 33.3% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain.              |
| The boundary condition name is: S1 Outlet.                  |

```

```

| The fluid name is: Turbulent model of a smoke pipe with barriers
|
| If this situation persists, consider switching
| to an Opening type boundary condition instead.
+-----+
| H-Energy      | 1.00 | 1.6E-03 | 1.0E-01 | 5.7 2.9E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE       | 1.02 | 6.0E-04 | 1.7E-02 | 5.7 1.1E-02 OK|
| E-Diss.K       | 1.05 | 1.3E-03 | 4.4E-02 | 7.5 4.9E-03 OK|
+-----+-----+-----+-----+-----+
+-----+
| Warning!
|
| After waiting for 33 seconds, 1 solver manager process(es) appear |
| not to have noticed that this run has ended. You may get errors |
| removing some files if they are still open in the solver manager. |
+-----+

```

This run of the ANSYS Fluent has finished.

ПРИЛОЖЕНИЯ 2. АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ЭВМ

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программага
КУБӨЛҮК

№ 870

Аталышы: *ANSYS CFX программалык комплексин колдонуу менен Бишкек шаарындагы ЖЭБдин морунан чыккан булгоочу заттардын таралышынын диффузиялык модели*

Автору (авторлору): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

Укук ээси (ээлери): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

KYRGYZPATENT

Алгачкы жарыяланган датасы, орду: *(KG)*

Өтүнмөнүн № *20230086.6*

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик реестринде катталган: *05.02.2024-ж.*

Директор  *Р. Керимбаева*



КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программага
КУБӨЛҮК

№ 871

Аталышы: *ANSYS Fluent программалык комплексин колдонуу менен мордон тоскоолдуктарга (имараттар жана үйлөр) түтүн агымынын турбуленттүү модели*

Автору (авторлору): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

Укук ээси (ээлери): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

KYRGYZPATENT

Алгачкы жарыяланган датасы, орду:

Өтүнмөнүн № 20230087.6

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик реестринде катталган: 07.02.2024-ж.



Директор

Р. Керимбаева

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программага
КУБӨЛҮК

№ 872

Аталышы: *LSTM (Long short-term memory) нейрон тармактарынын моделин колдонуу менен акыркы 100 жылда Кыргызстандын аймактарында абанын температурасынын өзгөрүү динамикасы*

Автору (авторлору): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

Укук ээси (ээлери): *Абдрасакова Айзада Байышбековна (KG)*

KYRGYZPATENT

Алгачкы жарыяланган датасы, орду:

Өтүнмөнүн № 20230088.6

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик реестринде катталган: 07.02.2024-ж.



Директор

Р. Керимбаева