

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
 ООП/ОПОП: Защита в чрезвычайных ситуациях  
 Отделение контроля и диагностики

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема работы
<b>Математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города</b>

УДК 519.876:504.5:656.13

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Е91	Шубина Кристина Юрьевна		

**Руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д. ф.-м. н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кащук И.В.	К.Т.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева И.Л.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП 20.03.01 Техносферная безопасность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вторушина А.Н.	К.Х.Н.		

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
20.03.01 Техносферная безопасность  
\_\_\_\_\_ А.Н. Вторушина  
02.02.2023 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
1E91	Шубина Кристина Юрьевна

Тема работы:

Математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	13.01.2023 г., №13 – 54/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	01.06.2023 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования: процесс загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города. Предмет исследования: математические модели распространения загрязняющих веществ от автотранспорта. Программное обеспечение, используемое для численного решения поставленной задачи: MATLAB.
<b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Анализ научной литературы и статистических данных по тематике исследования;</li><li>2. Изучение основных принципов математического моделирования процесса распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;</li><li>3. Применение численного метода для решения задачи, получение дискретного аналога;</li><li>4. Составление алгоритма решения поставленной задачи и реализация программного кода с использованием MATLAB;</li><li>5. Проведение численных расчетов с</li></ol>

	визуализацией результатов; б. Анализ влияния выбранных параметров на распространение загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кацук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	02.02.2023 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д. ф.-м. н.		02.02.2023 г.

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Е91	Шубина Кристина Юрьевна		02.02.2023 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность  
Уровень образования бакалавриат  
Отделение контроля и диагностики  
Период выполнения весенний семестр 2022/2023 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
1E91	Шубина Кристина Юрьевна

Тема работы:

Математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	01.06.2023 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.03.2023 г.	Введение 1. Литературный обзор	20
07.04.2023 г.	2. Физико-математическая постановка задачи и метод решения	30
10.05.2023 г.	3. Результаты исследования	20
25.05.2023 г.	4-5. Разработка раздела «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
07.06.2023 г.	6. Оформление и представление ВКР	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД	Перминов В.А.	д. ф.-м. н.		02.02.2023 г.

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП/ОПОП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вторушина А.Н.	к.х.н.		02.02.2023 г.

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E91	Шубина Кристина Юрьевна		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ  
по направлению 20.03.01 Техносферная безопасность**

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном (-ых) языке (-ах)
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
<b>УК(У)-9</b>	Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональных сферах
<b>УК(У)-10</b>	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
<b>УК(У)-11</b>	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
<b>УК(У)-12</b>	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен обеспечивать безопасность человека и сохранение окружающей среды, основываясь на принципах культуры безопасности и концепции риск-ориентированного мышления
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом государственных требований в области обеспечения безопасности

<b>ОПК(У)-4</b>	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
<b>Общепрофессиональные компетенции университета</b>	
<b>ДОПК(У)-1</b>	Способен ориентироваться в основных методах и системах обеспечения техносферной безопасности, обоснованно выбирать известные устройства, системы и методы защиты человека и окружающей среды
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способен к выполнению работ по обеспечению безопасности объектов защиты
<b>ПК(У)-2</b>	Способен к использованию знаний при разработке мероприятий по обеспечению безопасности объектов экономики
<b>ПК(У)-3</b>	Способен к управлению системами обеспечения безопасности в структурных подразделениях организации
<b>ПК(У)-4</b>	Способен определять степень риска в зонах воздействия опасных природных и техногенных факторов
<b>ПК(У)-5</b>	Готов осуществлять проверки безопасного состояния объектов различного назначения, участвовать в экспертизах их безопасности, регламентированных действующим законодательством Российской Федерации

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа		ФИО	
1E91		Шубина Кристина Юрьевна	
Школа	Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности	Отделение Школа	Отделение контроля и диагностики
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	20.03.01 Техносферная безопасность

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
<i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
<i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
<i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Оценка социальной эффективности НИ

### Перечень графического материала

Оценка конкурентоспособности НИ  
Матрица SWOT  
Диаграмма Ганта  
Бюджет НИ  
Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н, доцент		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E91	Шубина Кристина Юрьевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
1Е91		Шубина Кристина Юрьевна	
<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение контроля и диагностики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/ специальность</b>	20.03.01 Техносферная безопасность

Тема ВКР:

<b>Математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> загрязнение окружающей среды от автотранспорта.  <i>Область применения:</i> математическое моделирование, экология, охрана окружающей среды.  <i>Рабочая зона:</i> офисное помещение.  <i>Размеры помещения:</i> 4м*5м.                      Количество и наименование оборудования рабочей зоны: персональный компьютер (ПЭВМ) – 1 шт.  <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> контроль реализации программного кода, изменение исходных данных для решения разных вопросов задачи.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ;                      СП 2.2.3670-20 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда;                      ТК РФ Статья 100. Режим рабочего времени;                      ТК РФ Статья 108. Перерывы для отдыха и питания;                      ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;                      ГОСТ Р 52324-2005 (ИСО 13406-2:2001) Эргономические требования к работе с визуальными дисплеями, основанными на плоских панелях. Часть 2. Эргономические требования к дисплеям с плоскими панелями;                      ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> </ul>	<p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;</li> <li>2. Короткое замыкание.</li> </ol>



	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и (или) искусственного освещения;</li> <li>2. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего;</li> <li>3. Нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса;</li> <li>4. Длительность сосредоточенного наблюдения.</li> </ol> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</b> архитектурно-планировочные изменения расположения оборудования, защита расстоянием, использование устройств звукоизоляции, установка на оборудование шумоглушащих коробов, щитов, кожухов, размещение искусственных источников света непосредственно над рабочим местом работающего.</p>
<b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b>	<p>Воздействие на селитебную зону: не оказывает</p> <p>Воздействие на литосферу: утилизация комплектующих частей персонального компьютера, люминесцентных ламп, макулатуры.</p> <p>Воздействие на гидросферу: продукты жизнедеятельности персонала.</p> <p>Воздействие на атмосферу: токсические вещества, содержащиеся в компьютерных компонентах, при горении ПК.</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</b>	<p><b>Возможные ЧС:</b></p> <p>Техногенные – возгорание шнуров, сетевого фильтра или комплектующих ПК, приведшее к пожару, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения населения, несанкционированное проникновение посторонних лиц на рабочее место.</p> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> пожар.</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева Ирина Леонидовна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1E91	Шубина Кристина Юрьевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 98 с., 25 рис., 23 табл., 36 источников.

Ключевые слова: математическое моделирование, автотранспорт, загрязняющие вещества, метод контрольного объема, окружающая среда, атмосферный воздух.

Объектом исследования является процесс загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях городской застройки.

Цель работы – разработка математической модели и компьютерной программы для анализа распределения загрязняющих веществ от автотранспорта в атмосфере в условиях городской застройки.

В ходе работы проводились: экспериментальные расчёты интенсивности движения автотранспорта на улицах г. Томска, анализ статистических данных о метеоусловиях, разработка программного кода и численное решение поставленной задачи.

В результате исследования процесс распространения загрязняющих веществ от автотранспорта в условиях города описан в рамках физической и математической постановки задачи с учётом скорости ветра, интенсивности движения и транспортного состава, что позволяет изучить влияние выбранных параметров на распространение загрязняющих веществ от автотранспорта и оценить эффективность природоохранных мероприятий.

Степень внедрения: публикация разработанной модели в научных сборниках, представление результатов исследования на международных конференциях.

Область применения: экология, охрана окружающей среды, математическое моделирование.

Экономическая значимость работы объясняется тем, что исследование позволяет с высокой точностью рассчитать распространение загрязняющих веществ от автотранспорта в условиях городского каньона без длительных и материально затратных экспериментов.

В будущем планируется реализация онлайн-платформы с удобным интерфейсом ввода данных, создание 3D-модели распространения загрязняющих веществ.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ГН – гигиенические нормативы;

ГОСТ – государственный стандарт;

ГОСТ Р – государственный стандарт Российской Федерации;

ИШНКБ – инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности;

МЭК – международная электротехническая комиссия;

НИ – научное исследование;

НИ ТПУ – Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

НИР – научно-исследовательская работа;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ПДК<sub>мр</sub> – предельно допустимая концентрация максимально разовая;

ПДК<sub>сс</sub> – предельно допустимая концентрация среднесуточная;

ПК – персональный компьютер;

ПУЭ – правила устройства электроустановок;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

РФ – Российская Федерация;

СанПиН – санитарно-эпидемиологические правила и нормы;

СП – свод правил;

ССБТ – система стандартов безопасности труда;

ТК РФ – трудовой кодекс Российской Федерации;

ФЗ – Федеральный закон.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	14
1. Литературный обзор.....	16
1.1 Загрязнение окружающей среды от автотранспорта.....	16
1.1.1 Анализ экологической обстановки в России.....	16
1.1.2 Количество легковых и грузовых автомобилей в РФ .....	17
1.1.3 Загрязняющие вещества, выделяемые автотранспортом.....	20
1.1.4 Негативное влияние автотранспорта на окружающую среду .....	21
1.1.5 Негативное влияние автотранспорта на здоровье человека .....	22
1.1.6 Режим «черного неба» .....	24
1.1.7 Действующие меры по снижению загрязнения воздуха от автотранспорта .....	25
1.2 Математическое моделирование .....	27
1.2.1 Основные принципы математического моделирования .....	27
1.2.2 Виды математических моделей .....	28
1.2.2 Модели прогнозирования загрязнения окружающей среды .....	33
2. Физико-математическая постановка задачи и.....	38
метод решения .....	38
2.1 Методы исследования.....	38
2.2 Этапы математического моделирования .....	40
2.3 Физическая постановка задачи .....	44
2.4 Математическая постановка задачи .....	47
2.5 Метод решения задачи.....	49
2.5.1 Численный метод решения.....	49
2.5.2 Метод контрольного объёма .....	51
2.5.3 Получение дискретного аналога.....	52
2.5.4 Особенности расчёта поля течения .....	54
2.5.5 Уравнение количества движения.....	56
2.5.6 Поправки скорости и давления.....	57
2.5.7 Создание компьютерного кода .....	58
3. Анализ результатов исследования.....	59
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	63
Введение .....	63
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	64
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	64
4.1.2 SWOT-анализ.....	65
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	69

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	69
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	70
4.3 Бюджет научно-технического исследования.....	73
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования.....	73
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования .....	73
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	74
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	76
4.3.5 Накладные расходы.....	76
4.3.6 Бюджет НИР .....	77
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	77
4.4.1 Определение социальной эффективности исследования.....	77
Выводы по разделу .....	78
5. Социальная ответственность.....	80
Введение .....	80
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	80
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	80
5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны .....	82
5.2 Производственная безопасность.....	83
5.2.1 Поражение электрическим током .....	84
5.2.2 Короткое замыкание .....	84
5.2.3 Отсутствие или недостаток необходимого естественного и (или) искусственного освещения.....	85
5.2.4 Отклонение параметров микроклимата .....	86
5.2.5 Нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса .....	87
5.2.6 Длительность сосредоточенность наблюдения.....	88
5.3 Экологическая безопасность .....	89
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90
Выводы по разделу .....	91
Заключение.....	92
Список использованных источников .....	95

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одна из главных экологических проблем мира – это загрязнение приземного слоя атмосферы. По данным исследователей Всемирной организации здравоохранения, от загрязнения воздуха ежегодно умирают от 4,2 до 7 миллионов человек во всём мире, так как большая часть людей проживает в городах, где загрязняющие вещества значительно превышают предельно допустимые концентрации [1]. К основным источникам загрязнения воздуха относятся: транспорт, промышленные предприятия, а также вещества, образующиеся при сжигании топлива и биомассы.

На долю загрязнения воздуха автомобильным транспортом в мегаполисах России приходится свыше 90%. Для ряда городов, где реализуется добыча угля, размещены атомные станции и другие объекты промышленности, именно отраслевые предприятия являются главными источниками загрязнения, но даже в этом случае автотранспорт оказывает колоссальное влияние на атмосферный воздух, так как на его долю приходятся оставшиеся 40-50% от общего загрязнения [2].

Чистый воздух – это необходимое условие для жизни человека, поэтому важно использовать все доступные ресурсы и технологические инструменты для решения существующей проблемы. Но дорогостоящие и длительные эксперименты, направленные на исследование загрязнения атмосферы от автотранспорта, малоэффективны в существующей экологической ситуации.

Использование математических моделей значительно упрощает оценку состояния атмосферного воздуха и мониторинг загрязнения окружающей среды, так как программный код позволяет на основе реальных данных проанализировать зависимость распространения загрязняющих веществ от разных параметров окружающей среды (транспортный состав, интенсивность движения, метеорологические условия).

Целью научного исследования является разработка математической модели и компьютерной программы для анализа распределения загрязняющих веществ от автотранспорта в атмосфере в условиях городской застройки.

Для реализации указанной цели поставлены следующие задачи:

1. подобрать и проанализировать научную литературу, статистические данные по тематике исследования;
2. ознакомиться с основными принципами математического моделирования процесса распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;
3. применить численный метод для решения задачи, получить дискретный аналог, составить алгоритм решения поставленной задачи;
4. реализовать программный код с использованием MATLAB;
5. провести численные расчеты с визуализацией результатов;
6. проанализировать влияние на распространение загрязняющих веществ выбранных параметров.

Практическая значимость научного исследования объясняется тем, что функционал программного кода позволяет решать разные задачи в области экологической безопасности для крупных городов России. Компьютерная программа не ограничивается мониторингом распространения загрязняющих примесей от автотранспорта в атмосфере, так как позволяет изменять исходные данные. Таким образом, данная математическая модель находит своё применение в оценке природоохранных мероприятий и определении оптимального расположения новых транспортных маршрутов в условиях городской застройки.

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Загрязнение окружающей среды от автотранспорта

### 1.1.1 Анализ экологической обстановки в России

Один из приоритетов Российской Федерации – это обеспечение экологической безопасности на территории страны, что подтверждается реализацией крупных национальных проектов, таких как «Экология» [3], а также обновлением законодательных норм и внедрением новых природоохранных мероприятий.

Вследствие большого внимания к «зелёной повестке» наблюдается положительный эффект, но действующих мер всё ещё недостаточно для создания благоприятной экологической обстановки на территории всей страны. Жители крупных городов и отдельных регионов ежедневно сталкиваются с повышенным уровнем загрязнения приземного слоя атмосферы (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Распределение субъектов РФ по доле проб (%) атмосферного воздуха с содержанием загрязняющих веществ, превышающих ПДК

Основными источниками загрязнения приземного слоя атмосферы являются [4]:

1. предприятия черной и цветной металлургии;
2. угольная промышленность;



3. добыча нефти и её переработка;
4. производство строительных материалов и цемента;
5. предприятия химической промышленности;
6. устройства для сжигания топлива, которые используются для работы электростанций, котельных и печей;
7. транспорт;
8. лесные пожары.

В тех городах, где промышленные объекты являются градообразующими, таких как Красноярск или Норильск, на долю стационарных источников промышленных предприятий приходится около 60% от общего загрязнения атмосферного воздуха, оставшиеся 40% занимает автомобильный транспорт [2].

На качество воздуха в мегаполисах страны, где не так много крупных отраслевых предприятий, колоссальное влияние оказывает автотранспорт. По материалам доклада о состоянии окружающей среды в Москве основным источником поступления загрязняющих веществ является автотранспорт (83%), на долю выбросов от стационарных источников промышленных объектов приходится 11%, а предприятиям теплоэнергетики принадлежит примерно 6% от суммарного объема выбросов загрязняющих веществ [5].

Таким образом, автотранспорт является одним из главных источников загрязнения атмосферного воздуха в России, вследствие чего большая часть населения страны дышит воздухом, который содержит высокие уровни загрязняющих веществ.

### **1.1.2 Количество легковых и грузовых автомобилей в РФ**

В соответствии с данными Росстата, наблюдается постоянный рост количества транспорта на улицах городов России. При анализе транспортного состава за 2021 год отмечается преобладающая доля легковых автомобилей (рисунок 1.2), которая по статистике ежегодно увеличивается [6].

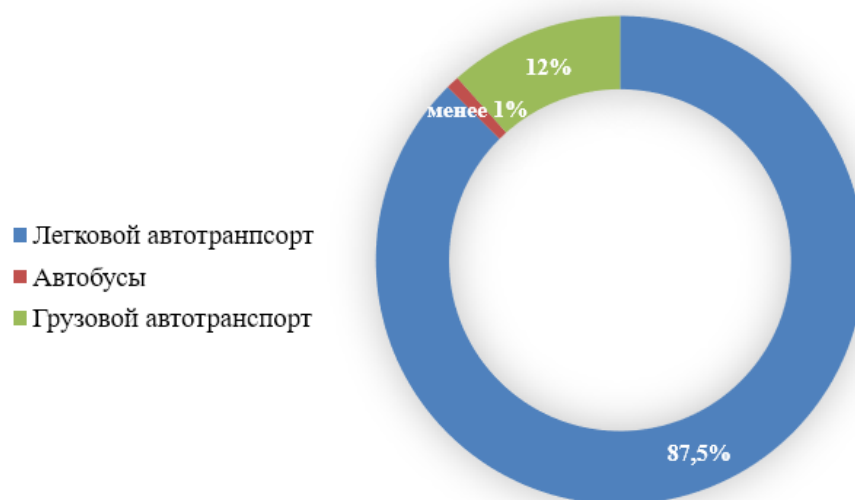


Рисунок 1.2 – Состав автотранспорта РФ за 2021 год

Количество легковых автомобилей ежегодно растёт (рисунок 1.3), что приводит к повышенной транспортной нагрузке вследствие невозможности расширения существующих дорог и улиц [6].

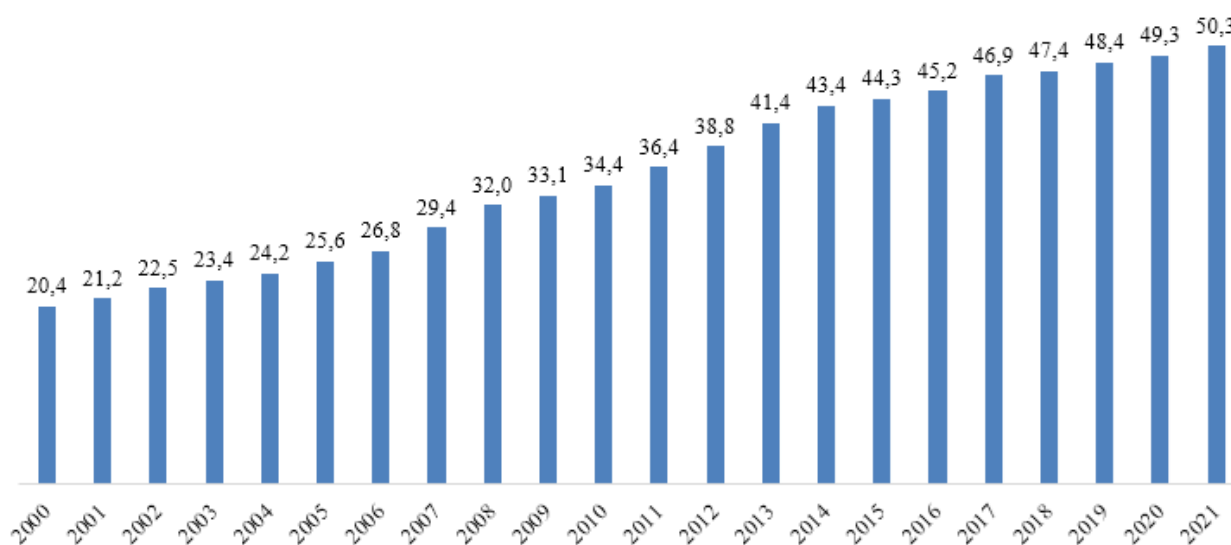


Рисунок 1.3 – Количество легковых автомобилей (на конец года, млн. штук)

Статистические данные Росстата свидетельствуют о возрастающем количестве грузовых автомобилей на территории страны (рисунок 1.4), что означает увеличение количества выбросов загрязняющих примесей [6].

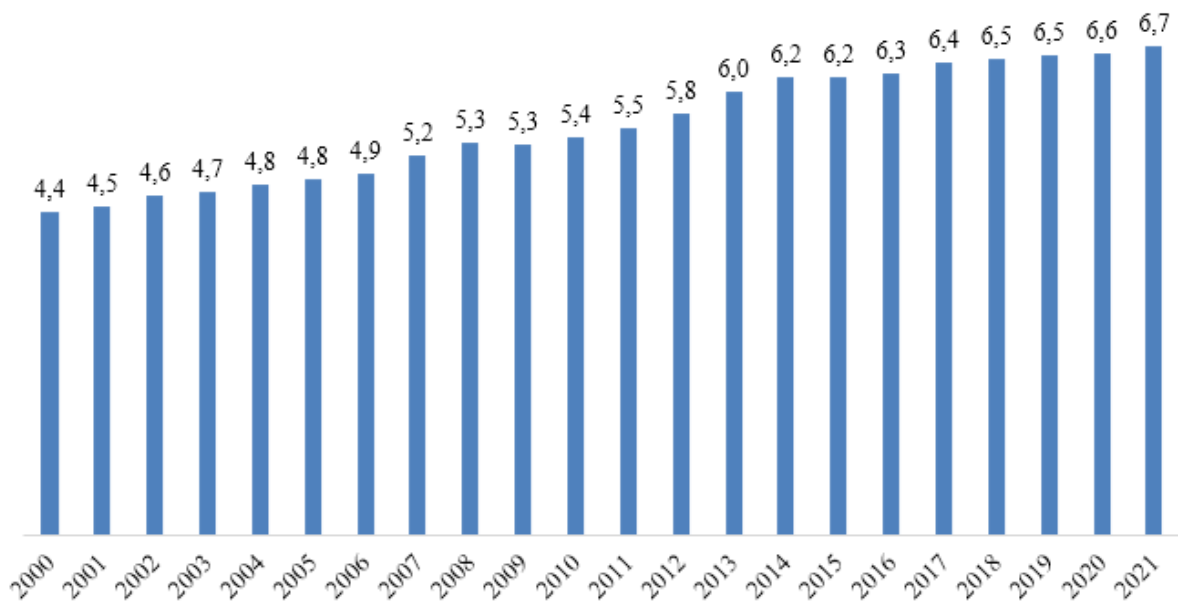


Рисунок 1.4 – Количество грузовых автомобилей (на конец года, млн. штук)

Несмотря на современные технологии, грузовые автомобили на территории РФ преимущественно используют дизельное топливо (рисунок 1.5), которое содержит значительно больше токсичных веществ в выхлопах, чем бензин или природный газ [6].

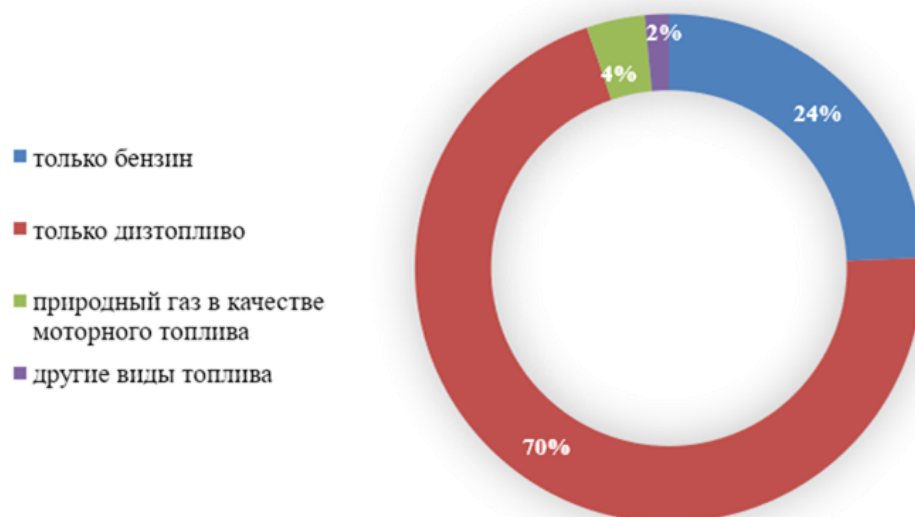


Рисунок 1.5 – Топливный состав грузовых автомобилей за 2021 год

Таким образом, постоянно растущие темпы процесса автомобилизации наносят значительный экологический ущерб окружающей среде и человеку. Ежегодное увеличение транспортной нагрузки является причиной повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха многих городов России.

### 1.1.3 Загрязняющие вещества, выделяемые автотранспортом

В соответствии с Федеральным законом №96, загрязнение атмосферного воздуха – это поступление в атмосферный воздух или образование в нём загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха [7].

Определяющую роль в формировании уровня загрязнения воздуха в приземном слое атмосферы имеют выхлопные газы автомобилей. Известно, что один автомобиль ежегодно поглощает из атмосферы в среднем более 4 т кислорода, выбрасывая при этом с отработавшими газами примерно 800 кг угарного газа, 40 кг оксидов азота. В одном литре бензина может содержаться около 1 г тетраэтилсвинца, который разрушается и выбрасывается в виде соединений свинца. В выбросах дизельного транспорта свинец отсутствует [8].

При сжигании топлива двигателями внутреннего сгорания в атмосферу поступает около 200 кг загрязняющих веществ, а именно диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), оксид углерода (CO), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), свинец (Pb), летучие углеводороды и производные от них твёрдые частицы, такие как бенз(а)пирен (супертоксикант) [1]. Также автомобильные выхлопы являются источниками канцерогенных веществ, сажи и альдегидов, которые оказывают вредное воздействие на организм человека.

Несмотря на то, что в дизельном топливе отсутствует свинец, негативное влияние дизеля превосходит другие виды топлива. В первую очередь негативное воздействие дизельного топлива объясняется тем, что выделяется больше двуокиси азота. Но даже при условии, что дизель потребляет меньше горючего и соответственно выбрасывает в атмосферу меньше двуокиси углерода и других вредных веществ, чем бензиновый двигатель той же мощности, выделяемые им мельчайшие частицы сажи проникают глубоко в лёгкие человека, вызывая раздражение, что свидетельствует об особо вредном влиянии на человека [9].

Одной из мер достижения экологической безопасности является мониторинг за выбросами от передвижных источников загрязнения. Для этого

используются нормативы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, закрепленных в ГН 2.2.5.686-98 [10]. В таблице 1.1 указаны предельно допустимые концентрации для основных загрязняющих веществ, выделяемых автотранспортом.

Таблица 1.1 – ПДК основных соединений выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания

Норматив	Соединение								
	СО	NO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Pb	Альдегиды			Взвешенные вещества
						СН <sub>2</sub> O	С <sub>4</sub> Н <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>4</sub> O	
ПДК <sub>мр</sub> , мг/м <sup>3</sup>	5	0,4	0,085	0,5	0,001	0,035	0,1	0,03	0,5
ПДК <sub>сс</sub> , мг/м <sup>3</sup>	3	0,06	0,04	0,05	0,0003	0,003	0,03	0,01	0,15

#### 1.1.4 Негативное влияние автотранспорта на окружающую среду

Автотранспорт оказывает негативное влияние на окружающую среду. Наиболее опасные виды вредного воздействия от легковых и грузовых автомобилей для природы:

1. загрязнение атмосферного воздуха, водоёмов и грунтовых вод;
2. эрозия почв;
3. негативное воздействие на климат.

Научные исследования в области экологии и природоохраны свидетельствуют о том, что вследствие продолжительной эксплуатации автомагистралей и постоянно возрастающей транспортной нагрузки, автомобильный транспорт оказывает негативное влияние на целые экосистемы, особенно на биоту придорожных зон, что приводит к деградации растительного покрова и снижению фотосинтеза у деревьев, произрастающих вблизи от проезжей части. Кроме этого, в отработанных газах автомобилей, выделяющихся при сгорании топлива, содержится свинец, который вместе с солями других металлов попадает в почву, в поверхностные и грунтовые воды, оказывая негативное влияние на литосферу и гидросферу Земли [1].

Ежедневные выбросы загрязняющих веществ опасны тем, что в долгосрочной перспективе это способствует климатическим изменениям.

Вследствие высокой концентрации углекислого газа и оксида азота в атмосфере возникает парниковый эффект, что увеличивает риск глобального потепления. Причина этого явления в том, что данные газы способны блокировать солнечные лучи, которые отражаются от поверхности Земли. В таком случае солнечная энергия попадает в атмосферу Земли, что вызывает отклонения в температуре. Также опасность постоянного превышения допустимого уровня концентрации  $\text{CO}_2$  и в атмосфере заключается в возможности возникновения кислотных дождей [11].

### **1.1.5 Негативное влияние автотранспорта на здоровье человека**

Автотранспорт – источник загрязнения окружающей среды, имеющий ряд специфических особенностей:

- высокий темп количественного роста;
- пространственная рассредоточенность;
- непосредственная близость к жилым районам;
- высокая токсичность выбросов выхлопных газов;
- сложность технической реализации средств защиты от загрязнений;
- низкое расположение источника загрязнения от земной поверхности.

В результате чего загрязняющие вещества, выбрасываемые автотранспортом, скапливаются в приземном слое атмосферы, то есть в зоне дыхания человека, и слабее рассеиваются естественным образом по сравнению с выбросами от промышленных объектов. Это объясняется тем, что вредные вещества отраслевых предприятий выводятся через дымовые и вентиляционные трубы значительной высоты.

В итоге, автомобильный транспорт является причиной возникновения в городах России обширных зон с устойчивым превышением санитарно-гигиенических нормативов загрязнения воздуха [12].

Наибольший ущерб здоровью человека наносят следующие вещества, выделяющиеся вследствие выбросов выхлопных газов от автотранспорта:

- оксид углерода (до 10 % у бензиновых двигателей и до 5 % у дизелей), так как данное вещество активно взаимодействует с гемоглобином крови, и даже при низких концентрациях СО снижается способность крови переносить кислород;
- оксиды азота (до 0,8 % у бензиновых двигателей и до 0,5 % у дизелей), так как монооксид азота при попадании в организм приводит к образованию соединений, препятствующих переносу кислорода к тканям, а диоксид азота вызывает раздражение слизистых оболочек глаза, носа, разрушают легкие человека;
- углеводороды (до 0,3 % у бензиновых двигателей и до 0,5 % у дизелей) оказывают на организм человека раздражающее и канцерогенное воздействие;
- твердые частицы (сажа) (до 0,04% у бензиновых двигателей и до 1,1% у дизелей) являются переносчиками канцерогенных веществ;
- свинец и другие тяжёлые металлы вызывают нервные расстройства, малокровие, потерю памяти, слепоту и гипертонию. [13].

Загрязнённость атмосферного воздуха зависит от интенсивности движения автотранспорта. Высокая транспортная нагрузка приводит к колебаниям грунта, что ускоряет процесс износа зданий. Вследствие постоянной эксплуатации легковых и грузовых автомобилей возникает фотохимический смог, образующийся при участии пыли, окислов азота и ультрафиолетовых лучей солнца. Негативное влияние фотохимического смога заключается в обострении лёгочных заболеваний, бронхиальной астмы, головной боли, а также в раздражение слизистой оболочки глаз и горла [11].

Вредное воздействие автотранспорта на человека не ограничивается выбросами отработавших газов. Автомобили – это источник высокого уровня шума, поэтому жители большинства российских городов сталкиваются со многими заболеваниями, вызванными постоянным шумовым загрязнением. Фоновый шум увеличивает содержание в крови гормонов стресса (кортизола,

адреналина и норадреналина), что негативно влияет на нервную систему человека. Также звуки с улицы даже при низкой интенсивности движения автотранспорта могут провоцировать сердечно-сосудистые заболевания. Поэтому риск инфаркта и инсульта в три раза выше у жителей кварталов, прилегающих к автомагистралям. Люди, живущие вблизи шоссе, также могут сталкиваться с уровнем шума в 67-77 дБ при норме 55 дБ днём и 35 дБ ночью, что может быть причиной ухудшения качества сна. Регулярное недосыпание приводит к снижению производительности труда, невнимательности, ухудшению реакции в стрессовых ситуациях [14].

### **1.1.6 Режим «черного неба»**

При неблагоприятных метеорологических условиях в городах может вводиться режим «чёрного неба». Это такая ситуация, при которой загрязняющие примеси значительно хуже рассеиваются в городском каньоне. К причинам возникновения данного явления относятся:

- морозная/жаркая и безветренная погода,
- особенности географического положения города,
- техногенные факторы.

Периодически режим «чёрного неба» вводится в Красноярске, Челябинске, Кемерово и других крупных городах России. В феврале 2023 года с данной ситуацией столкнулись жители Томска. Синоптики пояснили, что наступление такого режима произошло вследствие антициклонального типа погоды, проявлением которого являются определенные метеорологические условия: ослабление ветра, штиль, туманы. Такая погода способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха — выбросы, которые идут в атмосферу, не распространяются в верхние слои, а остаются у земли. Именно поэтому администрация города рекомендовала жителям максимально отказаться от использования личных автомобилей, а предприятиям было необходимо обеспечить сокращение выбросов загрязняющих веществ на 15-20% [15].



### **1.1.7 Действующие меры по снижению загрязнения воздуха от автотранспорта**

Государственное регулирование в области охраны атмосферного воздуха закреплено в федеральном законе №96. К основным полномочиям органов государственной власти относятся [8]:

- разработка и принятие законов, нормативно-правовых актов в области охраны атмосферного воздуха;
- мониторинг качества воздушной среды;
- разработка методик расчёта и прогнозирования выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников;
- анализ качества воздуха путём сопоставления с гигиеническими нормативами,
- реализация федеральных и региональных программ в целях уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сокращения использования нефтепродуктов и других видов топлива, сжигание которых приводит к загрязнению атмосферного воздуха, и стимулирования производства и применения экологически безопасных видов топлива и других энергоносителей;
- введение ограничений на передвижение транспортных средств в населенных пунктах, местах отдыха и туризма, на особо охраняемых территориях в целях уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- информирование населения об экологической обстановке.

По данным Росприроднадзора за 2021 год общий объем загрязняющих веществ в атмосферном воздухе увеличился на 0,3% по сравнению с 2020 г. Выбросы загрязняющих выбросов в атмосферный воздух от стационарных источников увеличились по сравнению с ростом в 2020 г на 1,5 % вследствие восстановления промышленного производства в 2021 г. на фоне стагнации в

отрасли 2020 г. Также в 2021 г. наблюдалось обострение заболевания от передвижных источников относительно 2020 г. [16].

В государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» проанализирована эффективность следующих мероприятий по снижению загрязнения атмосферного воздуха от стационарных и передвижных источников [16]:

- совершенствование технологических процессов,
- строительство и ввод в действие новых пылегазоочистных установок и обеспечений;
- повышение эффективности очистных установок.

Анализ состояния атмосферного воздуха в России за 2021 г. показывает, что основные загрязнители существуют на среднем уровне. По результатам года удалось выполнить план по уменьшению присутствия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, но не все меры оказались эффективными. Так, строительство новых пылегазоочистных установок и обеспечений не было реализовано в полном объёме, поэтому фактический результат оказался сильно ниже ожидаемого. Следовательно, необходимо разработать дополнительные мероприятия по снижению выбросов загрязняющих примесей.

Страны Евросоюза уверенно переходят на электромобили, значительно снижая уровень вредного воздействия от автотранспорта на окружающую среду. Запрет покупки новых автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на государственном уровне является одной из самых эффективных мер защиты атмосферного воздуха [17].

В России недостаточно компетенций для производства электромобилей, вследствие чего планы на полный переход не такие амбициозные. Но с каждым годом количество данного вида транспорта увеличивается в крупных городах страны, строятся новые зарядные станции в разных регионах, что свидетельствует о снижении процента дизельного и бензинового топлива в

общем транспортном составе, что положительно влияет на качество потребляемого воздуха.

Существует необходимость планирования оптимального использования автотранспорта. На государственном уровне вводятся запреты и ограничения на въезд грузового транспорта на определённые территории крупных городов. Данные мероприятия не только способствуют сохранению дорожного полотна, но и снижают выбросы загрязняющих веществ от сжигания дизельного топлива.

Высокая интенсивность эксплуатации транспортных средств обеспечивает поступление в атмосферный воздух такого количества токсичных веществ, которое не может быть разбавлено естественным путем до допустимого уровня концентраций. Наличие городской застройки усугубляет ситуацию, препятствуя быстрому рассеиванию загрязнений в воздухе. Для снижения негативного воздействия от автотранспорта и улучшения качества воздуха используют газозащитную функцию растений. Полосы зелёных насаждений на магистральных улицах частично поглощают отдельные компоненты отработавших газов, тем самым снижая их концентрацию в атмосферном воздухе [18].

Оценить эффективность внедряемых мероприятий позволяет математическое моделирование. Программный код визуализирует распространение загрязняющих примесей в атмосфере в зависимости от метеорологических условий, интенсивности движения и транспортного состава. Данная математическая модель учитывает особенности городской застройки, что помогает в лучшей мере понять, насколько снизится негативное влияние автотранспорта на качество воздуха, потребляемого жителями кварталами, после реализации планов по озеленению или ограничению въезда грузовых автомобилей.

## **1.2 Математическое моделирование**

### **1.2.1 Основные принципы математического моделирования**

Математическое моделирование – научный метод, позволяющий описать реальный объект математическими уравнениями с учётом его особенностей.

Данный вид моделирования позволяет решить те задачи, которые нельзя исследовать аналитическим методом. Широкое применение математическое моделирование находит в технической, экологической, экономической и других научных сферах деятельности, где цена расчётной ошибки недопустимо высока. Популярность этой методологии объясняется тем, что существующие теоретические методы уже не отвечают в полной мере современным исследовательским вызовам, а проведение эксперимента часто оказывается невозможным вследствие высоких материальных и временных затрат.

Главный инструмент математического моделирования – это математическая модель, под которой подразумевается заменитель объекта-оригинала, сохраняющий все его типичные и важные для исследования характеристики. В качестве математической модели могут выступать не только физические объекты, но и процессы. Для того чтобы построить точную математическую модель, необходимо отбросить все несущественное, определить набор параметров, характеризующих состояние системы и проанализировать зависимость между выбранными параметрами [19].

К основным принципам математического моделирования можно отнести:

- чёткую формулировку основных понятий и предложений, основанную на опыте;
- анализ адекватности используемой модели;
- гарантированную точность вычислительных алгоритмов.

Сам процесс исследования включает в несколько ключевых этапов: для начала прописывается постановка задачи, а уже на её основе строится математическая модель, затем исследователи занимаются поиском решения с помощью модели, анализируют и корректируют полученные результаты.

### **1.2.2 Виды математических моделей**

Математические модели классифицируют по ряду признаков [20]. Прежде всего модели зависят от свойств и характеристик реального объекта. В таком случае, математические модели делятся следующим образом:

- функциональные (имеют форму системы уравнений, описывают процесс функционирования моделируемого объекта);
- структурные (имеют форму матриц и списков векторов, отражают структурные характеристики моделируемого объекта).

Если рассмотреть функциональные математические модели подробнее, то по способу получения они подразделяются на:

- теоретические (являются универсальными, такие модели получают на основе физических законов);
- формальные (частные случаи, получают на основе поведения реального объекта во внешней среде);
- эмпирические (получают при помощи эксперимента и обработки статистических данных).

Экспериментальная и статистическая модели объединяют все биометрические методы для основной обработки экспериментальной информации. Основное назначение этих моделей:

- стандартизировать или собирать экологическую информацию;
- исследование, количественная оценка и значимая интерпретация
- причинно-следственная связь между эко системными переменными;
- оценить надежность и продуктивность различных предположений о взаимном влиянии наблюдаемых явлений и факторов, которые на них влияют. [27].

В целом, экспериментальные статистические модели являются основой для построения «примитивных» моделей и моделей других типов (в основном имитационных). Важной методологической проблемой является определение характера взаимосвязи между эффективными факторами и показателями: эффективными, случайными, прямыми, обратными, прямыми или изогнутыми и т.д. Использование теоретических и статистических стандартов, практического опыта и сравнительных методов. Параллельные и динамические ряды, анализ и обобщение исходной информации, графические методы и т.д.

Эмпирический и статистический методы прогнозирования загрязнения воздуха состоит из определения внутренних закономерностей процесса загрязнения воздуха в помещениях и прогнозирования их будущих уровней концентрации примесей, которые постоянно измеряются во времени. Влияние метеорологических факторов учитывается косвенно – в соответствии с фактическим уровнем загрязнения воздуха в истории. Этот метод реализуется путем построения авторских регрессивных уравнений. Коэффициенты уравнений оцениваются методом наименьших квадратов по ежемесячным «банковским» данным. Прогноз опережает событие 1-2 часа.

Рассмотренные эмпирические модели не полностью соответствуют необходимым условиям, которые выдвинуты модели, служащей для прогнозирования и контроля загрязнения воздуха в любой точке и точке города, соответствуют условиям, т.е.

- она имеет пространственно-временное разрешение, соответствующее изменению фокуса интересующей области в течение прогнозируемого периода;
- эффективность времени, необходимого для внедрения и использования информации о погоде, получаемой в режиме реального времени;
- разбираться с технологией перемещения потока и его перемешивания как можно полнее.

В этом случае пространственно-временной коэффициент выбирается в соответствии с целью использования модели. Рассматриваемые эмпирические зависимости определяются средними условиями в городах, поэтому их можно использовать с ограниченной информацией о дорожной обстановке и планировании главного здания. Кроме того, эти формулы не позволяют детально проанализировать влияние факторов автомобильного транспорта и архитектурно-планировочных факторов на изменение концентрации токсичных примесей в примагистральной зоне.

Математические модели бывают линейными и нелинейными в зависимости от используемых уравнений.

На рисунке 1.6 показана классификация математических моделей в зависимости от значений переменных и области определения.

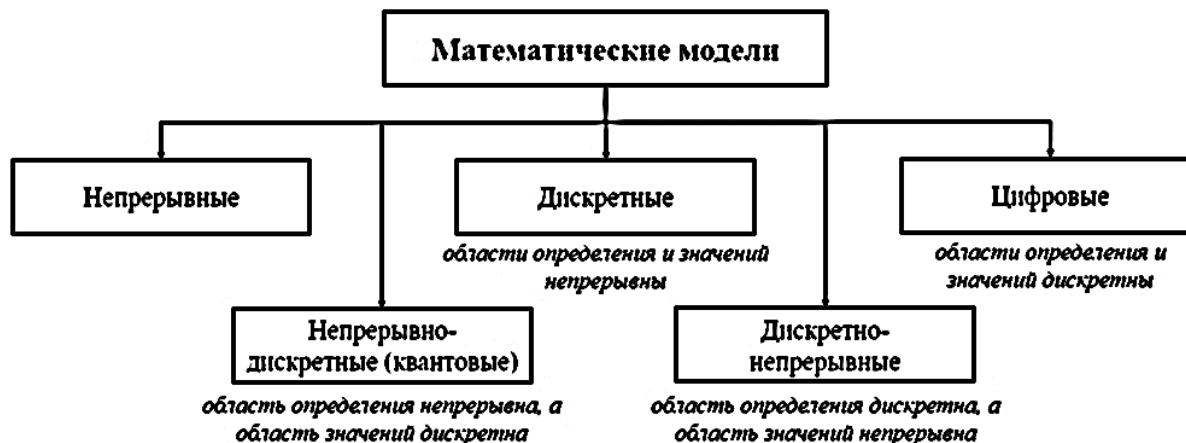


Рисунок 1.6 – Виды математических моделей в зависимости от значений переменных и области определения

Математические модели подразделяются на алгоритмические, аналитические и численные в зависимости от формы связи выходных, внешних и внутренних параметров.

### **Алгоритмические модели**

Алгоритмические математические модели основываются на алгоритмах, которые описывают последовательность однозначно интерпретируемых операций, выполняемых для получения необходимого результата. В таких моделях связь между выходными, внутренними и внешними параметрами представлена также в виде алгоритмов.

### **Аналитические модели**

Аналитические математические модели представляют собой описание физического объекта или процесса математическими формулами выходных параметров как функций от входных и внутренних параметров. Обязательные составляющие аналитической модели: критерии, неизвестные, данные, математические операции, ограничения.

Важно учитывать, что такие модели не отличаются структурным подобием с моделируемым объектом, то есть в аналитических моделях отсутствует

однозначное соответствие элементов и связей с реальным объектом или процессом.

Аналитическая модель позволяет проанализировать и решить математическими средствами множество инженерных задач, направленных на оптимизацию процессов, протекающих в технологических системах, а также вычисление важных характеристик самих систем. Как правило, такие модели строятся на основе аппарата математического программирования, корреляционного и регрессионного анализа. Если рассмотреть подробнее аналитическую модель, построенную на основе математического программирования, то можно увидеть, что такая модель состоит из целевой функции, которая выражает искомую характеристику объекта, переменных, реализующих технические параметры объекта и систему ограничивающих переменных, подразумевающих допустимые предельные значения.

Аналитические модели позволяют варьировать размерность расчётной области, что можно считать их преимуществом. Для реальных производственных систем получение оптимального решения является сложной задачей с точки зрения вычислений. В таком случае прибегают к разбиению большой задачи на подзадачи с меньшей размерностью, чтобы автономные решения подзадач давали решения для основной. Иной способ повысить вычислительную эффективность – это уменьшить точность, что позволяет сократить время решения задач.

Методы исследования аналитических моделей представлены на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Методы исследования аналитической модели



Недостатком аналитических моделей является то, что их точность снижается с усложнением исследуемого объекта или процесса. Для простых задач подобные модели достаточно эффективны, но для сложных систем требуется существенное упрощение. Это позволяет получить ориентировочные результаты, но для более точного решения рекомендуется использовать другие методы моделирования.

### **Численная модель**

Численные модели ограничиваются решениями численными методами для конкретных начальных условий и количественных характеристик моделей.

### **1.2.2 Модели прогнозирования загрязнения окружающей среды**

Математическое моделирование находит широкое применение в решении важных экологических задач, в частности используется для оценки и прогнозирования качества воздуха (рисунок 1.8), а также идентификации выбросов в приземный слой атмосферы. Для реализации точного прогноза используется моделирование распространения вредных загрязняющих примесей в атмосферном воздухе.

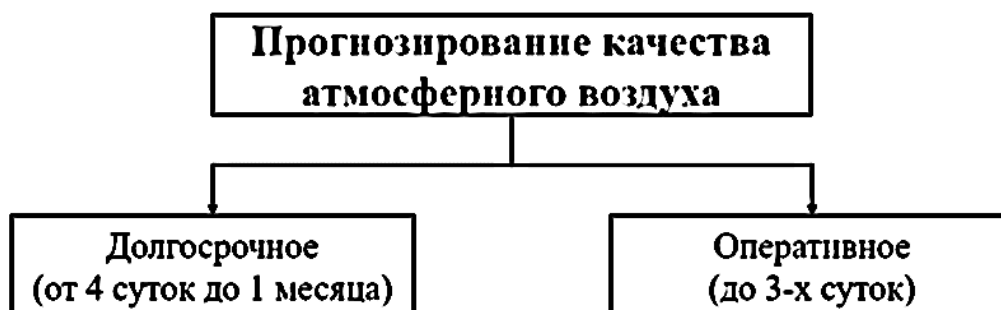


Рисунок 1.8 – Виды прогнозирования качества атмосферного воздуха

Для долгосрочного и оперативного прогнозирования применяются модели, основанные на решении уравнения турбулентной диффузии (рисунок 1.9). Эти модели положены в основу приказа Минприроды России № 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе", который широко применяется для решения инженерных задач в области загрязнения атмосферного воздуха [21].

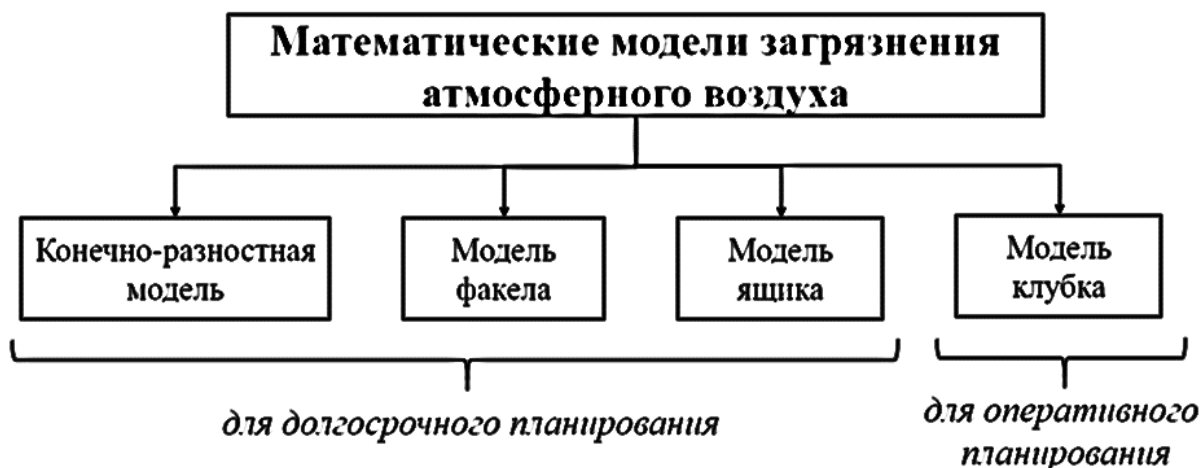


Рисунок 1.9 – Виды математических моделей загрязнения атмосферного воздуха

Большинство предложенных моделей в методике основываются на уравнении (1.1), получение которого возможно только при ряде допущений, например, отсутствие неоднородности атмосферы и распространения частиц загрязняющих примесей потоками воздуха, в том числе, предполагается, что сам источник загрязнения находится вне контрольной области [22].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1.1)$$

### Модель клубка

Для оперативного прогнозирования важна быстрота и простота реализации, поэтому в этом случае используются статистические модели линейной и нелинейной регрессии, такие как модель «клубка». Однако подобные методы расчётов не отличаются высокой точностью прогнозирования, так как в данных моделях не учитываются физические особенности процессов загрязнения атмосферного воздуха.

Модель клубка подразумевает, что действие источника загрязнения мгновенно, а перенос выбросов загрязняющих примесей представляется в движущейся системе координат с учётом ветра. Данная математическая модель формулируется следующим уравнением:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[ \left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-vt}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{z-wt}{\sigma_z}\right)^2 \right]\right), \quad (1.2)$$

где  $x, y, z$  – координаты центра «клубка», определяющие траекторию его движения;  $u, v, w$  – средние значения скоростей ветра по направлениям  $x, y, z$  в момент времени  $t$ ;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – стандартные отклонения размеров «клубка» в направлениях  $x, y, z$  соответственно;  $Q$  – количество загрязняющего вещества, выделенного источником в момент времени  $t$ .

Но модель «клубка» сложна в программной реализации, вследствие необходимости многократных измерений скоростей ветра по всем координатным направлениям и трудности определения параметров клубка загрязнения.

### **Модель факела**

Модель факела, так же как и модель клубка, основывается на уравнении 1.1, но отличительной особенностью является то, что в данном случае источник загрязнения рассматривается, как точечный и действующих непрерывно. Модель факела удобно использовать для анализа выбросов загрязняющих веществ от точечных источников, разных по высоте. Но важно учитывать, что предложенная модель также имеет ряд существенных допущений: не учитывается температура и характер выбросов, погодные условия однородны и не изменяются с течением времени, химические реакции с загрязняющим веществом не происходят, а загрязняющее вещество не поглощается поверхностью.

Математически модель факела описывается следующим образом:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y} \quad (1.3)$$

где  $C(x, y, z, H)$  – распределение концентрации по координатам  $x, y, z$ ;  $Q$  – скорость выделения загрязняющего вещества;  $u$  – средняя скорость ветра;  $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$  – стандартные отклонения размеров «факела» в горизонтальном и вертикальном направлениях при данном  $x, H = h + Dh$  – эффективная высота

подъёма факела;  $h$  – высота трубы;  $Dh$  – подъём факела вследствие его плавучести.

Данная модель применяется в 70% случаев для расчёта концентрации загрязняющих веществ по ограниченному количеству параметров, определяемых экспериментально.

### **Модель ящика**

Модель ящика формулируется уравнением 1.4 и используется для приближенной оценки уровня загрязняющего вещества от источников с большой поверхностью.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + Q^c. \quad (1.4)$$

При условии, указанном в уравнении 1.5, средняя концентрация находится по уравнению 1.6.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (1.5)$$

$$C = \frac{Q^c}{ulh'} \quad (1.6)$$

где  $l$  – ширина «ящика»,  $h$  – высота,  $C$  – средняя концентрация у задней (по направлению ветра) стенки «ящика»;  $u$  – средняя скорость ветра через «ящик».

### **Конечно-разностная модель**

Если уравнение диффузии решается численно, то получаются конечно-разностные модели, которые не зависят от параметров среды, граничных условий и самого источника. Такие модели характеризуются неустойчивостью и большой вероятностью вычислительных ошибок.

Таким образом, существующие модели, предназначенные для оценки распространения загрязняющих веществ от стационарных и нестационарных источников, построены с учётом допущений, что снижает точность результатов. Ключевым недостатком действующих методик анализа загрязнения атмосферного воздуха является отсутствие удобной компьютерной программы,

позволяющей оперативно получать результаты, не понижая их точность. Кроме того, для решений экологических задач большее значение имеет визуализация. Использование программного обеспечения позволяет не только получить точные результаты, но и визуализировать распределение загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

## **2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ**

### **2.1 Методы исследования**

Существует вариативность подходов к проведению исследования. Определить основные характеристики распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы можно экспериментальным и теоретическим методом. Для того чтобы выбрать способ исследования, необходимо проанализировать каждый подход и выбрать наиболее эффективный метод.

#### **Экспериментальный метод**

Эксперимент используют в том случае, если необходимо получить наиболее достоверную информацию о физическом объекте или процессе, так как данный способ исследования основывается на измерениях в натуральных условиях. Но не всегда получается провести полномасштабные опыты вследствие экономической нецелесообразности или невозможности самого эксперимента. Тогда учёные создают маломасштабные модели как альтернативу реальным объектам и процессам, но при таком подходе исследователи часто сталкиваются со сложностью экстраполяции полученных результатов на реальный объект, так как общие правила для этого не предусмотрены. Но это не единственная проблема. Важно понимать, что маломасштабные модели как правило не учитывают все свойства полномасштабного объекта, что значительно снижает точность результатов эксперимента. Кроме этого, недостатком данного подхода является то, что измерительное оборудование даёт погрешность, особенно в тех случаях, когда проведение измерений затруднено.

#### **Теоретический метод**

Как правило, для получения результата по конкретной задаче используют математические модели, учитывающие особенности физического объекта или процесса и представляющие собой систему дифференциальных уравнений. На этом принципе основываются многие теоретические исследования, представляющие практический интерес. Недостатком данного подхода можно считать сложность числовой оценки, так как в некоторых случаях теоретические

решения содержат бесконечные ряды, специальные функции и т. д. Но практически для любой задачи существует возможность математической постановки и численного исследования, так как числовые методы постоянно совершенствуются.

Кроме этого, теоретическое исследование имеет ряд преимуществ перед проведением эксперимента. Сама возможность проведения исследования часто ставится под вопрос вследствие сложности поиска финансирования. Поэтому невысокая себестоимость теоретических исследований является их главным преимуществом. Эта особенность аналитического решения имеет колоссальное значение при усложнении исследования и увеличения его масштабов.

Сегодня перед учёными стоит задача провести исследование не только качественно, но и быстро. Используя теоретический подход, научные сотрудники имеют возможность за несколько часов просчитать различные вариации поставленной задачи и предоставить оптимальное решение, в то время как эксперимент предполагает значительные временные затраты.

Несмотря на низкую стоимость и быстроту реализации, численные решения дают возможность получить достоверные и подробные результаты. Математическое моделирование физических процессов позволяет рассчитать все неизвестные переменные, такие как скорость, давление, температура и концентрация по всей контрольной области. В условиях эксперимента невозможно отследить распределение выбранных переменных по всей расчётной области, поэтому такие исследования часто подкрепляются аналитическими результатами.

Теоретические исследования обязательно учитывают особенности реальных условий. При постановке эксперимента не всегда соблюдаются натурные условия физических процессов, но благодаря аналитическим методикам для реальных условий исследуемого процесса можно составить численное уравнение.

Теоретический метод позволяет решать разные вариации задачи, где имеют значение только выборочные характеристики физического процесса.

Таким образом, для получения точного результата учёные могут сконцентрировать своё внимание на нескольких важных переменных и отбросить несущественные явления. Для этого используют идеальные модели физических объектов или процессов, а также допускают двумерность, постоянство плотности или бесконечно быструю реакцию. В условиях эксперимента невозможно достичь идеальных условий.

В результате анализа методов исследования можно сделать вывод о том, что расчёт экономически целесообразнее и наиболее эффективнее для решения конкретно поставленной задачи, учитывающей несколько взаимосвязанных параметров и взаимодействующих явлений. В том случае, если исследование предполагает изучение новых фундаментальных явлений и процессов, учёные используют экспериментальный подход.

## **2.2 Этапы математического моделирования**

Математическое моделирование – это основа вычислительного эксперимента, где теоретическое описание строится на базовых принципах прикладной математики. Как уже изучено, при построении моделей учитываются не только основные физические процессы, но и те параметры, которые важны для получения результата в условиях конкретной инженерной задачи. Для реализации математического моделирования используются персональные компьютеры и соответствующие программные обеспечения [1].

Суть вычислительно эксперимента заключается в том, что программный код позволяет вычислить по заданным параметрам искомые величины. Затем проводится анализ и верификация полученных результатов.

Схематично процесс математического моделирования представлен на рисунке 2.1, где отражены основные этапы вычислительного эксперимента.



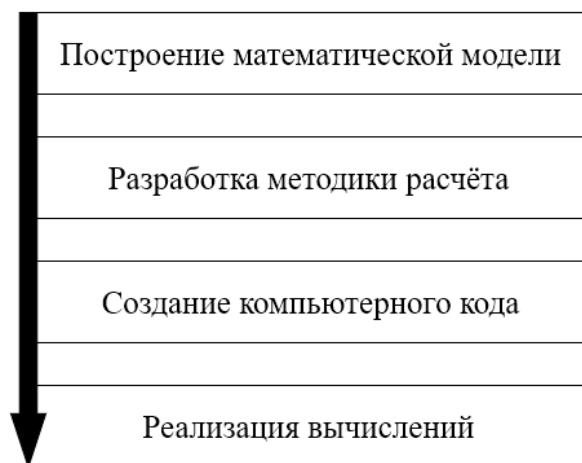


Рисунок 2.1 – Этапы вычислительного эксперимента

Для решения инженерной задачи методом математического моделирования важен выбор модели и её точное математическое описание. На первом этапе рассматривается физический процесс или объект, который подлежит дальнейшему моделированию: определяются параметры и характеристики, которые необходимо учесть, а те, что не влияют на результат – отбрасываются. Также важно понять, какие допущения и ограничения вводятся при математической формулировке задачи, что соответственно, повлияет на качество реализации модели и точность результатов. Следующий шаг – выбор метода решения поставленной задачи с учётом её особенностей. Затем следует реализация полученной математической модели и проведение вычислений. Последний шаг – это верификация результатов [19]. На рисунке 2.2 схематично изображены основные этапы построения математической модели.



Рисунок 2.2 – Этапы построения математической модели

В основе любого вычислительного эксперимента лежат алгоритмы, то есть последовательное решение алгебраических выражений и логических операторов. Каждая инженерная задача имеет свои особенности, поэтому в разных случаях используются приближённые или численные методы решения, которые имеют обязательные требования, представленные на рисунке 2.3.

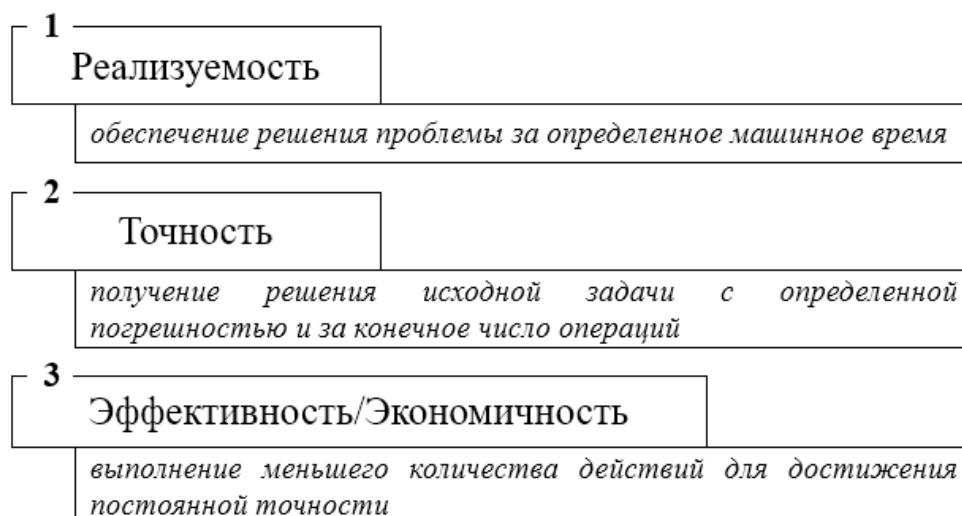


Рисунок 2.3 – Основные требования для методов решения

Сегодня существует большое количество проверенных алгоритмических методов, поэтому выбор способа решения задачи сводится к анализу эффективности метода и точности получаемых результатов.

Наиболее сложный этап математического моделирования – составление программного кода и поиск функционального программного обеспечения для его реализации. Для исследователя важно выбрать подходящий язык программирования или метод кодирования с учётом ресурсов вычислительной машины из всего существующего многообразия. Этот этап сложен тем, что программирование – это отдельная наука, которая построена на определённых принципах, использует для решения задач разные подходы и методы. Необходимо проанализировать несколько доступных программных обеспечений, чтобы окончательно выбрать подходящее. На этом этапе важно обратить внимание на его внутреннее наполнение: языки программирования, библиотеки, трансляторы и компиляторы.

В конечном итоге вычислительный эксперимент сводится к проведению расчётов с обязательным использованием ПЭВМ. В данном случае, исследователи задают не прямой вопрос природе на языке математических в отличие от лабораторных экспериментов. После получения результатов в цифровом виде требуется их расшифровка.

Анализ полученных результатов – обязательный этап математического моделирования. После реализации вычислительных расчётов необходимо сравнить их с экспериментальными данными или с результатами других апробированных исследований, чтобы убедиться в их достоверности. Также обработка результатов позволяет сделать выводы о качестве самой модели, то есть анализ даёт возможность убедиться в надёжности или внести необходимые изменения для улучшения.

Таким образом, основу вычислительного эксперимента составляет математическая модель, построенная по принципу алгоритма. На сегодняшний день математического моделирование применяется для решения многих инженерных задач, так как сочетает в себе преимущества вычислительного и

экспериментального подхода. Данный метод решения удобен тем, что результатом является единый пакет программных преобразований, позволяющий проводить вычисления для разных исходных данных.

Наиболее важным преимуществом вычислительного эксперимента является возможность исследования объекта без прямого воздействия на рабочую среду. Также математическое моделирование позволяет изучить выборочные характеристики объекта, отбросив параметры, не влияющие на результат. При проведении эксперимента невозможно не учитывать особенности окружающей среды. Математические модели интересны тем, что дают возможность анализировать процессы, сложно реализуемые на практике. Таким образом, данный метод решения инженерных задач является одним из наиболее эффективных.

### **2.3 Физическая постановка задачи**

Исследование основано на экспериментальных данных и представляет собой упрощение общей физической модели, а также её дальнейшее развитие для математического описания распределения загрязняющих веществ от автомобилей.

Физическая постановка задачи формулировалась для реального участка города Томска. Исследовалась автодорога шириной 12 м (6 полос) в условиях городской застройки: расположенные по обе стороны от дороги 9-ти этажный и 2-ух этажный дом. а именно улица Нахимова, выделенная на рисунке 2.4 красным цветом.



Рисунок 2.4 – Схема участка г. Томска, выбранного для математического моделирования

Для экспериментального расчёта интенсивности движения и транспортного состава по улице Нахимова (выделена красным цветом на рисунке 2.5) были использованы онлайн-камеры города Томска [23].



Рисунок 2.5 – Данные онлайн-камеры г. Томска

В рамках предложенной системы уравнений, сформулированной на основе физических процессов, перенос загрязняющих веществ от автомобильного транспорта осуществляется турбулентной диффузией и конвекцией.

Система уравнений для определения скорости распространения примесей и структуры загрязнения приземного слоя атмосферы была получена в ходе

постановки задачи с использованием значений коэффициентов тепло- и массообмена, а также предположении об изобаричности рассматриваемого процесса.

В результате численного решения полученной системы уравнений было выявлено, что увеличение скорости распространения вредных веществ, выделяемых автотранспортом, связано с рядом факторов: увеличением скорости ветра, эффективного коэффициента турбулентной вязкости, объемной доли сухого органического вещества в городах.

В условиях поставленной задачи считается, что:

1. плотность газовой фазы не зависит от давления из-за низкой скорости потока по сравнению со скоростью звука;
2. поток течения в приземном слое является турбулентным, а ламинарным переносом пренебрегаем;
3. скорость ветра направлена перпендикулярно автодороге;
4. по всей дороге движение распределено равномерно.

В исследовании представлена двумерная математическая модель, которая получена из уравнения Рейнольдса для турбулентного потока. В данном случае, задача решает вопросы прогнозирования распределения концентраций загрязняющих примесей вдоль плоскости, перпендикулярной автодороге.

Математическое моделирование — это метод исследования, использующий компьютерные технологии для замены реальных объектов, процессов или систем более удобными математическими моделями. Для достаточно длинной полосы движения с равномерным пространственным распределением вдоль дороги могут рассматриваться только два пространственных измерения. Соответствует горизонтальной и вертикальной составляющим, перпендикулярным дороге. Кроме того, предполагая, что длина здания намного больше, чем расстояние между зданиями, предположение о двумерной структуре может быть разумным. Турбулентное уравнение Рейнольдса применяется для описания конвективного переноса, управляемого ветром и гравитацией. Дорога моделируется как плоский источник выбросов с

известной температурой и концентрацией выбросов [24]. Поместим начало декартовой системы координат  $x_1, x_2 = 0$  на уровень шероховатости поверхности дороги. Ось  $Ox_2$  направлена вертикально, а ось  $Ox_1$  параллельна земле и перпендикулярна к дороге и совпадает с направлением ветра.

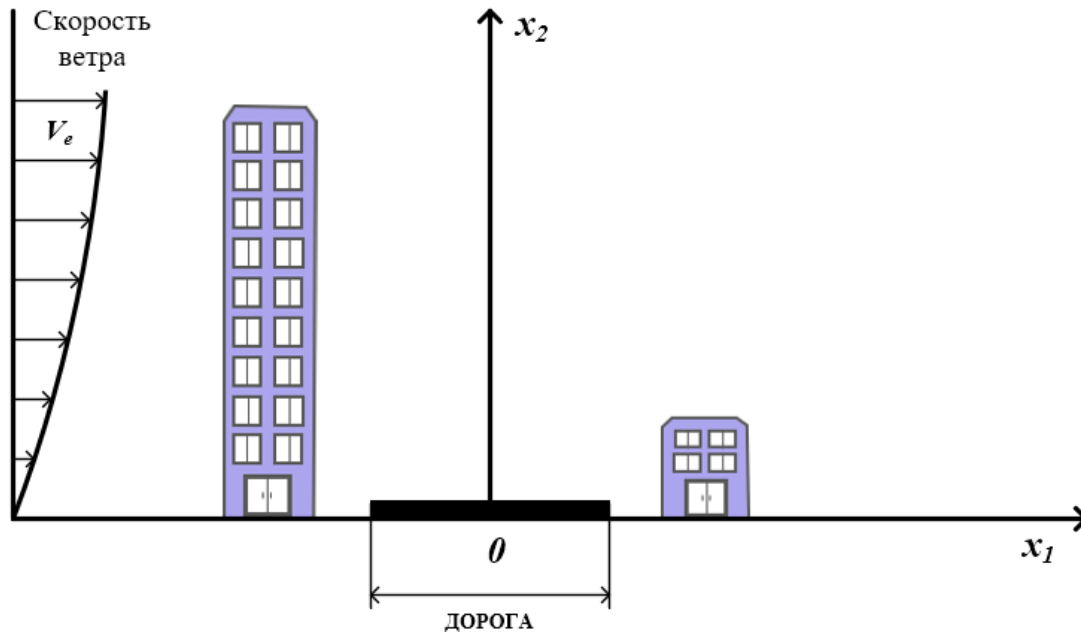


Рисунок 2.6 – Схема расчетной области

#### 2.4 Математическая постановка задачи

Математическая модель, полученная из уравнения Рейнольдса для турбулентного потока, используется для расчета распределения концентраций загрязняющих веществ вдоль плоскости, перпендикулярной шоссе.

Задача сводится к решению следующих уравнений (2.1) – (2.5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0; \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) - \rho s c_d v_i |\vec{v}| - \rho g_i; \quad (2.2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p \overline{v'_j T'}) - v_2 (p_e g + c_p \rho \frac{\partial T_e}{\partial x_2}); \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_j c'_\alpha}), \alpha = 1, 4; \quad (2.4)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_\alpha = 1, P_e = \rho R T \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \frac{\partial T_e}{\partial x_2} = \gamma_e, \vec{v} = (v_1, v_2), \vec{g} = (0, g). \quad (2.5)$$

Где  $d/dt$  – это символ полной производной;  $t$  – время;  $x_i, v_i$  ( $i = 1, 2$ ) – декартовы координаты и компоненты вектора скорости;  $\rho$  – плотность газа,  $T$  – температура;  $P$  – давление;  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;  $c_\alpha$  – массовые концентрации ( $\alpha = 1 - CO, 2 - CH_x, 3 - NO_x, 4 -$  сажа,  $5 -$  инертные компоненты воздуха);  $V_e$  – скорость ветра, заданная на высоте  $x_2 = 1,5$  м;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M_\alpha$  – молекулярная масса альфа-компоненты газовой фазы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma_e$  – градиент стратификации температуры;  $c_d$  – эмпирический коэффициент сопротивления растительности;  $s$  – удельная поверхность элемента растительности; индекс  $e$  соответствует невозмущенным параметрам среды. Приведенная выше система дифференциальных уравнений решалась учетом начальных и граничных условий:

$$t = 0: v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{ae}, T_s = T_e; \quad (2.6)$$

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e(x_2), v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{ae}; \quad (2.7)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0; \quad (2.8)$$

$$x_2 = 0: v_1 = 0, v_2 = V_{20}, T = T_0, c_\alpha = c_{a0}, |x_1| \leq x_{10}; \quad (2.9)$$

$$x_2 = 0: v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{ae}, |x_1| > x_{10}; \quad (2.10)$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0. \quad (2.11)$$

Уравнения (2.2) – (2.4) содержат компоненты тензора турбулентного напряжения и слагаемые, связанные с турбулентной диффузией и теплопроводностью. Турбулентный тепловой поток массы и импульса выражается средним градиентом потока:

$$-\overline{\rho v'_i v'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}, \quad (2.12)$$

$$-\overline{\rho v'_j c_p T'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\overline{\rho v'_j c'_\alpha} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j}, \quad (2.13)$$

$$\lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t}, \quad \rho D_t = \frac{\mu_t}{Sc_t}, \quad \mu_t = \frac{c_\mu \rho K^2}{\varepsilon}. \quad (2.14)$$



где  $\mu_t$  – турбулентная вязкость,  $\lambda_t$  – теплопроводность,  $D_t$  – коэффициент диффузии. Число Прандтля ( $Pr_t$ ) и Шмидта ( $Sc_t$ ) турбулентных течений принимается равным.

Значение  $\mu_t$  определяется в соответствии с моделью локальной равновесной турбулентности [25]:

$$\mu_t = \rho l \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right]^2 - \frac{g}{T Pr_t} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2.15)$$

где  $l$  – длина пути перемешивания и  $\theta = T - T_e$ .

## 2.5 Метод решения задачи

### 2.5.1 Численный метод решения

Для описания физического процесса математическим языком используются дифференциальные уравнения, представляющие собой основные законы физики, а именно законы сохранения массы, энергии и импульса. Данные уравнения описывают взаимосвязь между различными параметрами, влияющими конкретные физические величины, которые в свою очередь выступают в роли зависимых переменных. Таким образом, в основе любой математической модели лежит дифференциальное уравнение законов сохранения, которое в общем виде можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S, \quad (2.16)$$

где  $\phi$  – зависимая переменная, которая может обозначать массу вещества, температуру, скорость, кинетическую энергию турбулентности;  $\rho$  обозначает плотность,  $\Gamma$  – коэффициент диффузии и  $S$  – первый член. Значения  $\Gamma$  и  $S$ , зависящие от выбранной переменной  $\phi$ , должны быть заданы [26].

Уравнение состояние позволяет обозначит взаимосвязь плотности (уравнение 16) и массовой концентрации или температуры. Как и другие переменные, составляющие скорости также подчиняются обобщенному дифференциальному уравнению.

Важно учесть, что поле скорости обязательно удовлетворяет закону сохранения массы или уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u) = 0. \quad (2.17)$$

Для дальнейшего использования уравнений (2.17) и (2.18), представленных в векторном виде, преобразуем их с учётом декартовой системы координат:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (2.19)$$

где значение  $j$  определяется значениями: 1, 2 и 3, в зависимости от трех пространственных значений.

Наличие двух одинаковых индексов следует принимать как суммирование трёх аналогичных слагаемых:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho u_3), \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right). \quad (2.21)$$

Записать дифференциальное уравнение в обобщенном виде (16) позволяет безразмерность выбранных переменных и коэффициентов:  $\phi$ ,  $\Gamma$  и  $S$ . В большинстве случаев коэффициент диффузии  $\Gamma$  принимается равным единице, а значение  $S$  (источниковый член) варьируется: или 0, или 1.

Уравнения тепло- и массообмена, гидродинамики и турбулентности являются частными случаями обобщенного дифференциального уравнения (2.16) для зависимой переменной  $\phi$ , что позволяет решать инженерные задачи численным методом.

Таким образом, в основу программного кода закладывается последовательность математических операций для решения дифференциального уравнения в обобщённом виде (2.16). Суть вычислений заключается в том, чтобы найти  $\phi$  при соответствующих значениях  $\Gamma$  и  $S$  с учётом начальных и граничных условий. Использование уравнений в обобщенном виде позволяет решать их обобщенным численным методом, что даёт возможность применения данного подхода к большинству инженерных задач. Таким образом, составляются

многоцелевые расчетные программы, позволяющие модернизировать существующие математические модели, повышая их сложность и уточняя качество получаемых результатов.

### **2.5.2 Метод контрольного объёма**

Для создания программного кода необходимо получить дискретный аналог – систему алгебраических выражений, связывающую значение зависимой переменной  $\phi$  в определённой группе узловых точек. Дискретный аналог содержит в себе ту же информацию, что и дифференциальные уравнения, описывающие изменение  $\phi$  в зависимости от выбранных параметров. В данном случае методом дискретизации выбран метод контрольного объёма.

Важно учесть, что зависимая переменная  $\phi$  в определённой узловой точке влияет на распределение только в ближайшей окрестности. Соответственно, при большом количестве узловых точек можно предположить, что решение дискретного аналога сближается с точным решением соответствующего дифференциального уравнения. Это объясняется тем, что изменение  $\phi$  между соседними точками при сближении узловых точек становится малым, а тогда конкретный характер предполагаемого профиля становится несущественным.

Метод контрольного объёма заключается в том, что расчетную область разбивают на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Для нахождения дискретного аналога дифференциальное уравнение интегрируют по каждому контрольному объёму, чтобы найти значения  $\phi$  в нескольких узловых точках. Метод контрольного объёма позволяет с высокой точностью сохранить интегральные значения массы, количества движения и энергии в каждом контрольном объёме, а значит по все расчётной области. Данное свойство этого метода не зависит от количества узловых точек. [26].

В данном исследовании рассматривается двумерная задача. На рисунке 2.7 показан контрольный объём, по которому интегрируются дифференциальные уравнения.

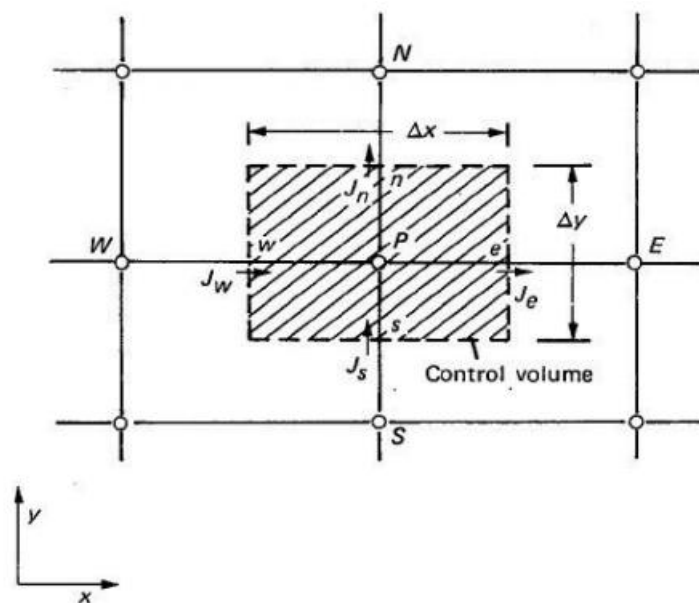


Рисунок 2.7 – Контрольный объем для двумерной задачи

### 2.5.3 Получение дискретного аналога

Для написания дискретного аналога для двумерного случая предположим, что площадь поверхности одного контрольного объема равна  $\Delta y \times 1$ .

Дифференциальное уравнение для двумерной задачи формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S, \quad (2.22)$$

где  $J_x, J_y$  – суммарные потоки конвекции и диффузии, имеющие вид:

$$J_x \equiv \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (2.23)$$

$$J_y \equiv \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (2.24)$$

где  $u$  – это компонент скорости по оси  $x$ ,  $v$  – это компонент скорости по вертикальной оси  $y$ .

В результате интегрирования дифференциального уравнения по контрольному объему (рисунок 2.5), получаем следующее выражение:

$$\frac{(\rho_P \rho \phi - \rho_P^0 \phi_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y. \quad (2.25)$$

В данном случае верхний индекс для  $\rho_P^0$  и  $\phi_P^0$  указывает на старые значения (на предыдущем шаге по времени). Остальные величины – новые значения, исходя из неполноценного метода аппроксимации.  $J_e, J_n$  и  $J_s$  – это суммарные

потоки, которые проинтегрированы по граням контрольного объёма. Так, для грани  $e$ :  $J_E = \int J_x d_y$ . Аналогично интегрируем по другим граням.

Уравнение неразрывности (2.1) также интегрируется по контрольному объёму, в итоге получим следующее уравнение:

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + F_e - F_w + F_n - F_s = 0, \quad (2.26)$$

где  $F_e$ ,  $F_w$ ,  $F_n$  и  $F_s$  – массовые расходы для разных граней контрольного объёма.

Так, в случае, если  $\rho u$  в точке  $e$  является преобладающей для грани  $e$ , то получаем следующее выражение:

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y. \quad (2.27)$$

Аналогично для других граней контрольного объёма:

$$\left. \begin{aligned} F_w &= (\rho u)_w \Delta y \\ F_n &= (\rho v)_n \Delta x \\ F_s &= (\rho v)_s \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Путём математических преобразований получаем уравнение:

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) - \\ - (J_s - F_s \phi_P) = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y. \end{aligned} \quad (2.28)$$

В выбранном методе предполагается постоянство ряда величин на гранях контрольного объёма, поэтому для таких слагаемых, как  $J_s - F_s \phi_P$ , запишем:

$$J_s - F_s \phi_P = a_E (\phi_P - \phi_E) \quad (2.29)$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [ -F_e, 0 ] \quad (2.30)$$

В данном случае  $D_e$  и  $D_w$ , также как  $F_e$  и  $F_w$ , содержат площадь  $\Delta y$  граней  $e$  и  $w$ .

Окончательное двумерное уравнение дискретизации записывается следующим образом:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b, \quad (2.31)$$

где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [ -F_e, 0 ]; \quad (2.32)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [ -F_w, 0 ]; \quad (2.32)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [ -F_n, 0 ]; \quad (2.32)$$

$$a_s = D_s A(|P_s|) + [|-F_s, 0|]; \quad (2.32)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_p^0 \phi_p^0; \quad (2.33)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y; \quad (2.34)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t}. \quad (2.35)$$

В данном случае значения  $\phi_p$ ,  $\phi_E$ ,  $\phi_w$ ,  $\phi_s$  являются неизвестными значениями в момент времени  $t$ , остальные являются известными значениями в моменты времени  $t + \Delta t$ .

Массовые расходы  $F_e$ ,  $F_w$ ,  $F_n$  и  $F_s$  определяются уравнениями проводимости в виде:

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e}, \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n}, \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s}. \quad (2.36)$$

Числа Пекле формулируются следующим образом:

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}, \quad P_n = \frac{F_n}{D_n}, \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}. \quad (2.37)$$

Функция  $A(|P|)$  формулируется по степенному закону и имеет вид:

$$A(|P|) = [0, (1 - 0.1|P|^5)]. \quad (2.38)$$

Физический смысл коэффициентов  $a_E$ ,  $a_w$ ,  $a_N$ , и  $a_s$  заключается в том, что влияние конвекции и диффузии учитываются в контрольных точках в зависимости от массового расхода  $F$  и проницаемости  $D$ . Коэффициент  $a_p^0 \phi_p^0$  показывает изменение  $\phi$  контрольного объёма к шагу по времени. Для других слагаемых физический смысл объясняется аналогичным образом [26].

#### 2.5.4 Особенности расчёта поля течения

Определение поля скорости является трудоёмкой задачей, практически невозможной. Трудность расчёта объясняется тем, что для решения используются нелинейные уравнения количества движения. В данном исследовании эта проблема минимизируется за счёт итераций, то есть, если бы мы знали некоторое начальное значение поля скорости, то могли бы решить уравнения скорости и получить искомые компоненты скорости итерационным методом. Однако сложность определения поля течения заключается в том, что нет явного уравнения для нахождения поля давления.

Для того чтобы преодолеть эти трудности расчёта, используется шахматная сетка, которая лежит в основе метода SIMPLE. На рисунке 2.8 показана схема, где компоненты скорости  $u$ , показанные короткими стрелками, рассчитываются на гранях контрольного объёма, а в узловых точках, обозначенных кружками, содержатся скалярные величины. Каждый контрольный объём ограничен пунктирной линией. Важным требованием является обязательное расположение компонента скорости  $u$  на грани контрольного объёма, независимо от того, лежит ли точка посередине между соседними узловыми точками [26].

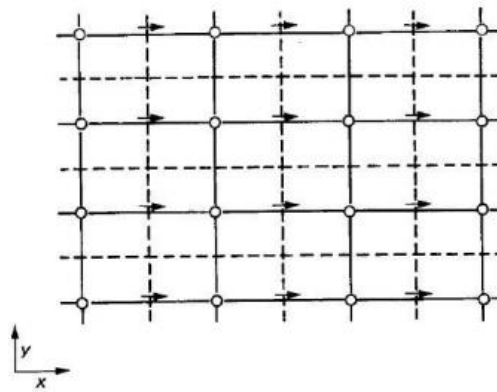


Рисунок 2.8 – Шахматная сетка для одномерной задачи

Для двумерного случая строится аналогичная шахматная сетка, но уже с учётом двух составляющих скорости:  $u$  и  $v$ . На рисунке 2.9 показан контрольный объём заштрихованной областью с узловой точкой в центре, компонента скорости  $u$  изображена горизонтальными стрелками по оси  $x$ , для  $v$  – стрелки вертикальные вдоль оси  $y$ .

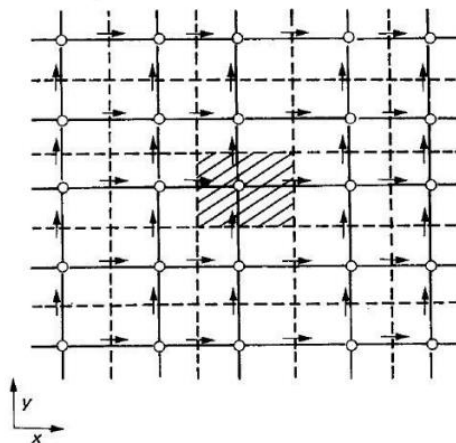


Рисунок 2.9 – Шахматная сетка для двумерной задачи

Шахматная сетка имеет ряд преимуществ, чем и объясняется удобство её использования для получения дискретного аналога. Во-первых, этот метод позволяет избежать сложностей с волнистыми полями скорости, которые не удовлетворяют уравнению неразрывности. В данном случае только физические поля скорости удовлетворяют уравнению неразрывности. Главным преимуществом шахматного расположения является то, что составляющая скорости определяется разностью давлений между двумя соседними узловыми точками. Шахматная сетка также исключает необходимость в интерполяции соответствующей составляющей скорости для определения массового расхода  $F$  через грани контрольного объёма [26].

### 2.5.5 Уравнение количества движения

Для уравнения количества движения контрольный объём схематично показан на рисунке 2.10.

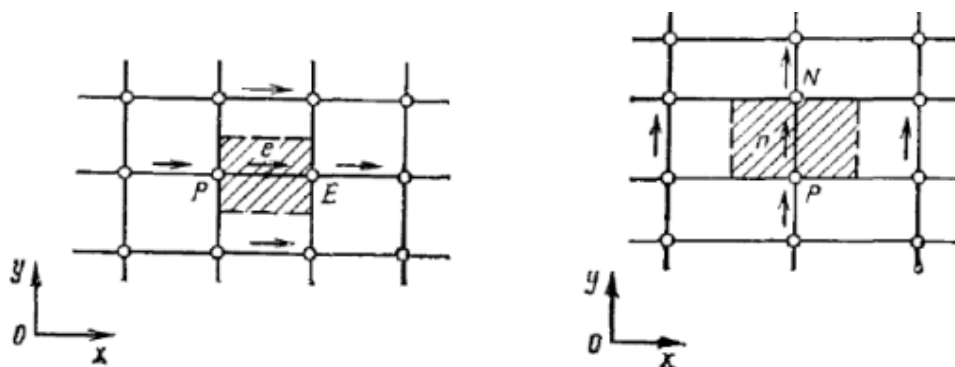


Рисунок 2.10 – Контрольный объём для составляющей скорости  $u$  и  $v$  соответственно

Если внимательно рассмотреть рисунок 2.8 для составляющей скорости  $u$ , то можно заметить, что контрольный объём смещён от обычного положения с центральной узловой точкой  $P$  и расположен между точкой  $e$  и соответствующими соседними точками. Смещение происходит только по оси  $x$ , при этом грани по оси  $y$  проходят через узловые точки  $P$  и  $E$ . В этом заключается ещё одно преимущество шахматной сетки: разность  $p_P - p_E$  можно использовать для определения силы давления, действующей на контрольный объём. [26].

В результате получаем дискретный аналог в виде:

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e, \quad (2.39)$$



где  $(p_P - p_E)A_e$  – сила давления, действующая на контрольный объём для составляющей скорости  $u$ ;  $A_e$  – площадь поверхности, на которую приходится сила давления.

Аналогичным образом получают дискретный аналог в других направлениях, например, для составляющей скорости  $v$ :

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (p_P - p_N) A_n. \quad (2.40)$$

Уравнение количества движения можно решить при условии найденного или заданного поля давления. В противном случае, решение с неверным полем давления не позволит найти верное поле скорости, которое бы удовлетворяло уравнению неразрывности. Для этого вводится верхний индекс «\*», который обозначает приближённое поле давления  $p^*$  через  $u^*$  и  $v^*$ . Тогда поле скорости находится следующим образом:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e, \quad (2.41)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n. \quad (2.42)$$

### 2.5.6 Поправки скорости и давления

Для того чтобы результирующее поле скорости удовлетворяло уравнению неразрывности, необходимо более точно сформулировать приближенное поле давления  $p^*$ . Истинное поле давления находится из следующего уравнения:

$$p = p^* + p', \quad (2.43)$$

где  $p'$  – поправка давления.

Аналогичным образом получаем поправки для компонентов скорости:

$$u = u^* + u', \quad (2.44)$$

$$v = v^* + v'. \quad (2.45)$$

Если из уравнения (2.39) вычтём (2.41), то получим следующее выражение:

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e. \quad (2.46)$$

Полунеявный метод SIMPLE позволяет отбросить  $\sum a_{nb} u_{nb}'$ , что значительно упрощает вычисления. Такое допущение объясняется тем, что этот член характеризует не прямое или неявное влияние поправки давления на

скорость, и при его отбрасывании вероятность ошибки отсутствует [26]. В результате исключения  $\sum a_{nb} u'_{nb}$  получаем:

$$a_e u'_e = (p'_P - p'_E) A_e. \quad (2.47)$$

Поправочная формула для скорости:

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E), \quad (2.48)$$

где

$$d_e = \frac{A_e}{a_e}. \quad (2.49)$$

Из уравнение (2.48) можно найти  $u_e$  с учётом поправок давления и скорости:

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E). \quad (2.50)$$

Аналогично для других составляющих скорости:

$$u_n = u_n^* + d_n (p'_P - p'_N). \quad (2.51)$$

### 2.5.7 Создание компьютерного кода

Для реализации численного решения создаётся программный код, на основе метода SIMPLE, алгоритм которого сводится к следующим шагам [26]:

1. Задание приближённого поля давления  $p^*$ ;
2. Решение уравнений движения (2.41) – (2.42);
3. Решение уравнения для поправки давления  $p'$ ;
4. Расчет давления  $p$  из уравнения (2.43);
5. Расчет поля скорости по формулам (2.50) – (2.51);
6. Решение дискретных аналогов для других переменных  $\phi$  (температура, концентрация и т.д.)
7. Представление скорректированного давления как нового  $p^*$  возвращение к п.2.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, в результате математического моделирования с помощью численного интегрирования получены распределения полей скорости, температуры и концентраций загрязняющих веществ от автотранспорта. На рисунке 3.1 – 3.5 представлены распределения линий равных уровней для концентрации CO и векторное поле скорости в момент времени  $t=100$  с. Температура окружающей среды составляла  $T=283$  К, скорость ветра  $V_e$  варьировалась от 1 м/с до 5 м/с, ширина автодороги 12 м, интенсивность движения менялась от 2500 авт./час до 4500 авт./час. Также задавался состав транспортного потока (легковые автомобили - 56%, грузовики и автобусы – 19%, автомобили с дизельным двигателем – 25%).

В окрестности автодороги, под действием архимедовой силы, происходит всплытие нагретых автомобильных выбросов. В результате их взаимодействия с внешним полем ветра происходит формирование векторного поля скорости и деформация изолиний концентрации компонентов газовой фазы. На картину течения также оказывает влияние городская застройка.

Для визуализации численных результатов, полученных на основе интегрирования математической модели, использовалось программное обеспечение MATLAB. На рисунках 3.1 – 3.5 показаны изолинии заданных концентраций, которые распределяются в атмосфере с течением времени и фиксируются в равновесном состоянии.

Обозначим значения используемых концентраций CO: 1 – 0,1 мг/м<sup>3</sup>, 2 – 0,5 мг/м<sup>3</sup>, 3 – 1,0 мг/м<sup>3</sup>, 4 – 2,0 мг/м<sup>3</sup>, 5 – 5,0 мг/м<sup>3</sup>, 6 – 6,0 мг/м<sup>3</sup>. Отметим, что для монооксида углерода ПДК<sub>мр</sub> = 5 мг/м<sup>3</sup>.

#### **Анализ распространения CO в атмосфере в зависимости от метеорологических условий**

На рисунках 3.1 – 3.3 показано распространение загрязняющей примеси (CO) при разных метеорологических условиях, а именно при увеличении скорости ветра.

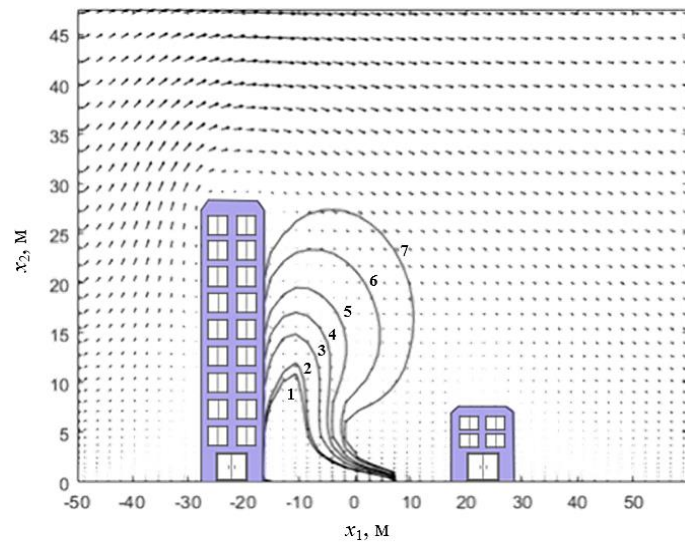


Рисунок 3.1 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации CO при скорости ветра 1 м/с; интенсивность движения 2500 авт./час

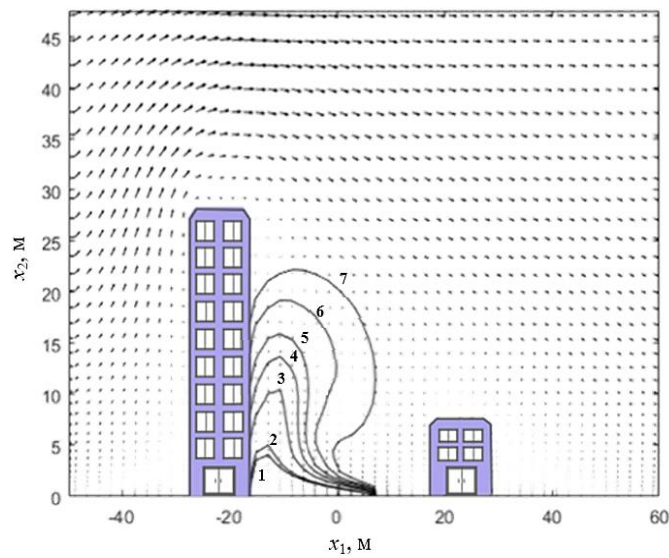


Рисунок 3.2 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации CO при скорости ветра 3 м/с; интенсивность движения 2500 авт./час

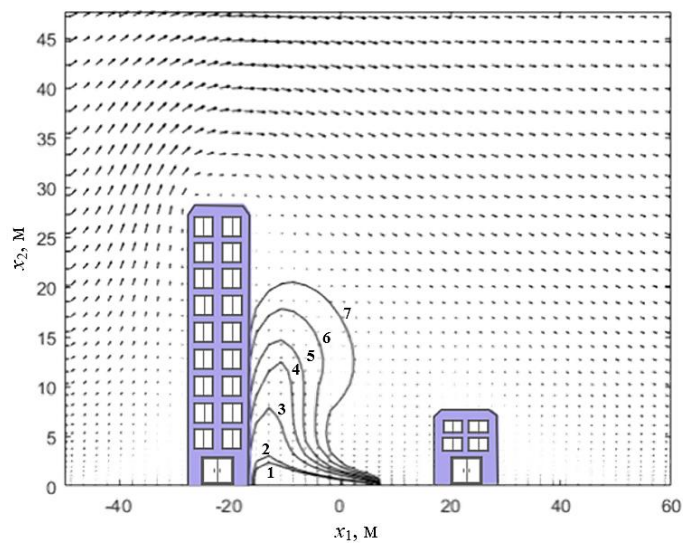


Рисунок 3.3 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации CO при скорости ветра 5 м/с; интенсивность движения 2500 авт./час

По полученным результатам можно сделать вывод, что при увеличении скорости ветра происходит более интенсивный перенос загрязняющих веществ. При порывах ветра 10 м/с и более наблюдается завихрение изолиний концентрации (рисунок 3.4).

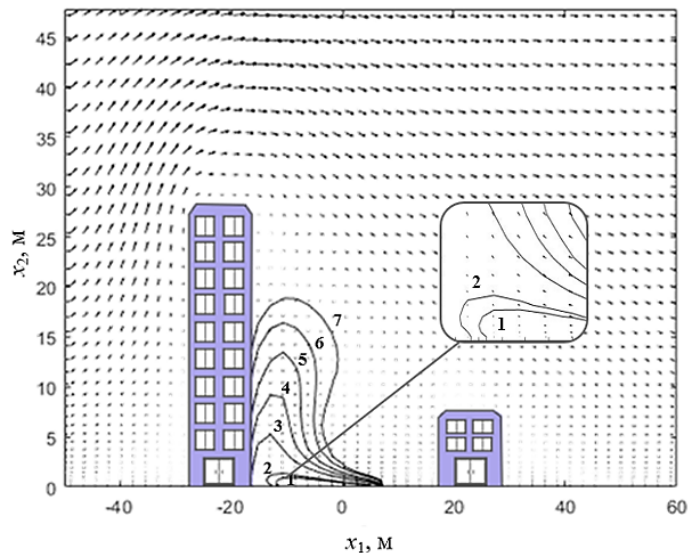


Рисунок 3.4 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации CO при скорости ветра 10 м/с; интенсивность движения 2500 авт./час

### **Анализ распространения CO в атмосфере в зависимости от интенсивности движения автотранспорта**

Для оценки влияния интенсивности движения автотранспорта на распределение CO сравним рисунок 3.2 с результатами на рисунках 3.5 и 3.6.

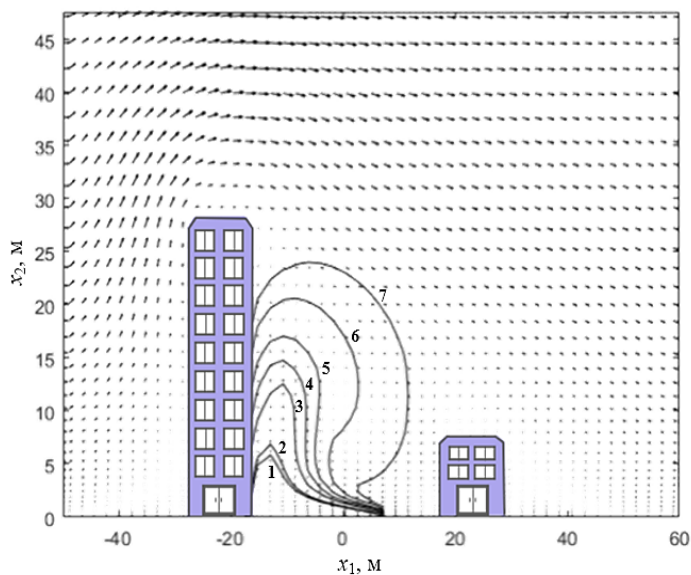


Рисунок 3.5 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации CO при скорости ветра 3 м/с; интенсивность движения 3500 авт./час

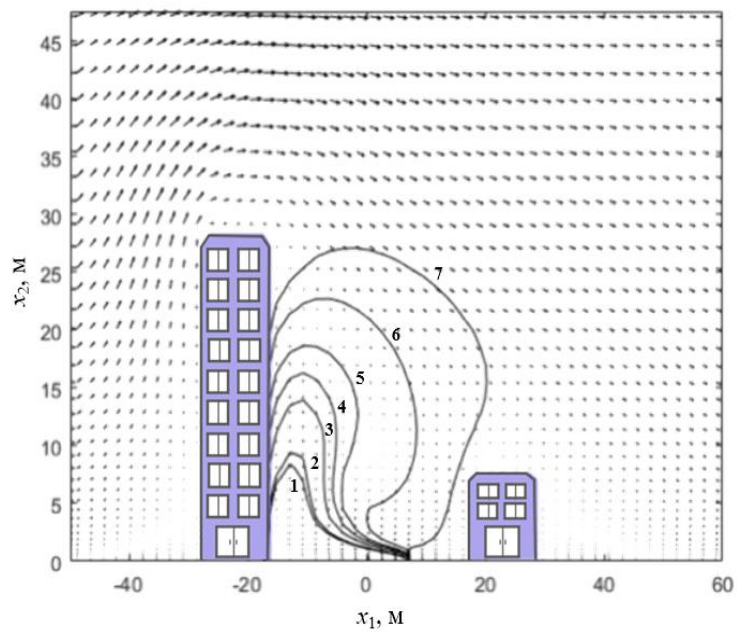


Рисунок 3.6 – Векторное поле скорости и изолинии концентрации  $CO$  при скорости ветра  $3 \text{ м/с}$ ; интенсивность движения  $4500 \text{ авт./час}$

Таким образом, при увеличении интенсивности автотранспорта загрязняющие примеси распространяются на большее расстояние, происходит вынос  $CO$  из уличного каньона.

## **4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

### **Введение**

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной НИ (ВКР) – разработка математической модели и компьютерной программы для анализа распределения загрязняющих веществ от автотранспорта в атмосфере в условиях городской застройки.

## 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводится с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4.1.

Критерии для сравнения и оценки подбирались исходя из выбранных объектов сравнения с учетом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Данная разработка сравнивается с альтернативными программными продуктами подобного класса: программа ANSYS ( $K_1$ ) и PHOENICS ( $K_2$ ).

Таблица 4.1 - Сравнение конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	5	3	4	0,75	0,45	0,6
2. Надежность	0,1	3	2	2	0,3	0,2	0,2
3. Безопасность	0,12	5	3	3	0,6	0,36	0,36
4. Потребность в ресурсах памяти	0,07	4	3	5	0,28	0,21	0,35
5. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,08	4	3	3	0,32	0,24	0,24
6. Простота эксплуатации	0,09	5	2	2	0,45	0,18	0,18
7. Качество интеллектуального интерфейса	0,09	4	3	2	0,36	0,27	0,18
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
2. Цена	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
3. Финансирование научной разработки	0,05	4	2	3	0,2	0,1	0,15
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>30</b>	<b>4,26</b>	<b>2,66</b>	<b>3,01</b>



Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Сравнивая значения интегральных показателей  $K$  для используемой в работе программы и ее аналогов, мы можем сделать вывод, что программный продукт MATLAB является более эффективным и конкурентоспособным и превосходит имеющиеся на рынке продукты-конкуренты. Преимущество MATLAB состоит в том, что в данном программном обеспечении основной упор сделан на улучшение визуального восприятия оператора, а именно: качество, содержательность графиков зависимостей, построение которых не требует огромных усилий в связи с простотой и легкостью языка программирования. Другим отличительным достоинством является наличие полного пакета для работы без необходимости поиска внешних библиотек и реализации дополнительных функций.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1. Минимальное вмешательство пользователя.	Сл1. Программа реализована на английском языке.
С2. Использование современного оборудования и программного обеспечения.	Сл2. Ограниченная область применения продукта.
С3. Доступность и удобство в использовании.	Сл3. Ограниченный круг решаемых задач.

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С4. Высокая скорость работы и возможность быстрого получения результата;	Сл4. Параллельное развитие новых конкурентноспособных технологий.
С5. Наглядная и понятная визуализация результатов (графики и т.д.).	Сл5. Отсутствие графической оболочки программного кода.
С6. Низкая стоимость разработки.	
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Применение разработки для решения задач в области обеспечения экологической безопасности на федеральном уровне.	У1. Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.
В2. Возможность использования в научных, образовательных и прикладных целях.	У2. Низкая заинтересованность в исследовании.
В3. Появление потенциального спроса на новые разработки.	У3. Появление конкурентов и новых технологий.
В4. Возможность бесперебойной работы программы для низких требований к ПЭВМ.	У4. Необученность оператора ПЭВМ.

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>							
<b>Возможности проекта</b>		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	+	+	+	+
	B2	-	+	+	+	+	-
	B3	-	+	+	+	+	+
	B4	-	+	+	+	-	-

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

<b>Слабые стороны проекта</b>						
<b>Возможности проекта</b>		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	+	+	-	-
	B2	+	+	+	+	+
	B3	+	-	-	-	+
	B4	-	-	-	+	+

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>							
<b>Угрозы проекта</b>		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	-	+	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-	-	-
	У3	-	-	-	-	-	-
	У4	-	-	-	-	-	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	-	-	-	-	-
	У2	-	-	-	+	+
	У3	+	+	+	+	+
	У4	+	-	-	-	+

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>С1. Минимальное вмешательство пользователя. С2. Использование современного оборудования и программного обеспечения. С3. Доступность и удобство в использовании. С4. Высокая скорость работы и возможность быстрого получения результата; С5. Наглядная и понятная визуализация результатов (графики и т.д.). С6. Низкая стоимость разработки.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>Сл1. Программа реализована на английском языке. Сл2. Ограниченная область применения продукта. Сл3. Ограниченный круг решаемых задач. Сл4. Параллельное развитие новых конкурентноспособных технологий. Сл5. Отсутствие графической оболочки программного кода.</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Применение разработки для решения задач в области обеспечения экологической безопасности на федеральном уровне. В2. Возможность использования в научных, образовательных и прикладных целях. В3. Появление потенциального спроса на новые разработки. В4. Возможность бесперебойной работы программы для низких</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>В1С1С2С3С4С5С6. Данное исследование применимо для оценки эффективности природоохранных мер и мониторинга загрязнения окружающей среды от автотранспорта В2С2С3С4С5 и В3С2С3С4С5С6. Полученные результаты исследования могут послужить основой для новых научных разработок по снижению загрязнения атмосферного воздуха от автотранспорта. В4С2С3С4. Компьютерная программа на базе MATLAB не требует высоких характеристик ПЭВМ, что расширяет круг пользователей.</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>Применение программы осложняется тем, что в MATLAB отсутствует русский язык. Также сдерживающим фактором является ограниченность рассматриваемых задач, отсутствие универсальности применения.</p>

требований к ПЭВМ.		
<b>Угрозы</b> У1. Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы. У2. Низкая заинтересованность в исследовании. У3. Появление конкурентов и новых технологий. У4. Необученность оператора ПЭВМ.	<b>Угрозы развития</b> У1С2. Вследствие постоянных обновлений программного обеспечения и модернизации технических средств возможно введение дополнительных государственных требований и сертификации программы, что увеличивает время выхода продукта на рынок.	<b>Уязвимости:</b> У2Сл4Сл5. Уязвимость данного программного решения заключается в отсутствии удобного пользовательского интерфейса. У3Сл1Сл2Сл3Сл4Сл5. Появление конкурентов с новой более универсальной технологией на русском языке. У4Сл1Сл5. Необученный сотрудник для работы с ПЭВМ не сможет реализовать программный код.

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ

осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение темы НИ, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения работ	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования и решения поставленной задачи	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение функционала программы «MATLAB»	Инженер
	6	Математическое моделирование распространения загрязняющих веществ от автотранспорта	Инженер, научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	7	Обработка полученных данных	Инженер
	8	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР	9	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни;  
 $t_{\text{min}i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – общее количество праздничных дней в году (2023 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\text{min}}$ , чел-дни		$t_{\text{max}}$ , чел-дни		$t_{\text{ожг}}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение темы НИ, утверждение плана-графика	1	-	3	-	1,8	-	1,8	3
2. Календарное планирование выполнения работ	1	3	3	5	1,8	3,8	2,8	4
3. Обзор научной литературы	-	14	-	21	-	16,8	16,8	25
4. Выбор методов исследования и решения поставленной задачи	-	14	-	21	-	16,8	16,8	25
5. Изучение функционала программы «MATLAB»	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
6. Математическое моделирование распространения загрязняющих веществ от автотранспорта	3	7	5	7	10	4,6	6,4	10
7. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	12	18

Продолжение таблицы 4.9

8. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	5
9. Составление пояснительной записки	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
<b>Итого:</b>	7	66	15	93	16,4	68,5	66,9	105

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T <sub>кi</sub> кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение темы ВКР, утверждение плана-графика	Исп1 Исп2	3	█												
2	Календарное планирование выполнения работ	Исп1 Исп2	4	█												
3	Обзор научной литературы	Исп2	25		█	█										
4	Выбор методов исследования и решения поставленной задачи	Исп2	25				█	█	█							
5	Изучение функционала программы «MATLAB»	Исп2	6							█						
6	Математическое моделирование распространения загрязняющих веществ от автотранспорта	Исп1 Исп2	10							█	█					
7	Обработка полученных данных	Исп2	18									█	█			
8	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	5											█		
9	Составление пояснительной записки	Исп2	9												█	

Примечание:

█ – Исп. 1 (научный руководитель), █ – Исп. 2 (инженер)



### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3–5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты расчетов занесены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Материальные затраты на исследование

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Бумага офисная	лист	150	0,7	105
Комплекс канцелярских принадлежностей	набор	3	340	1020
Картридж для лазерного принтера	шт.	1	3490	3490
Электроэнергия	кВт/час	190	3,85	731,5
Интернет	Гб	10	63	630
<b>Итого:</b>				<b>5976,5</b>

#### 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и

эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	ПЭВМ	1	3	30	30
<b>Итого</b>		30 тыс. руб.			

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,33 \cdot 30000}{12} \cdot 3 = 2475 \text{ руб.}$$

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где  $Z_{он}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где  $Z_{мс}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52/14	104/14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48/5	24/10
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{те}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{он}, руб$	$T_{р}, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	16,4	35215,7
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	68,5	119402,4
Итого:								154618,12

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 35215,7 = 5282,36 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 119402,4 = 17910,4 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

#### 4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (35215,7 + 5282,36) = 12149,4 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (119402,4 + 17910,4) = 41193,8 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

#### 4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
2475	5976,5	154618,12	23192,8	53343,2	239605,62

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.16)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

$$Z_{\text{накл}} = \frac{230296,1}{5} \cdot 0,2 = 9584,2$$

#### 4.3.6 Бюджет НИР

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ «Математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта в условиях города» по форме, приведенной в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы, руб	Стоимость бюджета, руб
2475	5976,5	154618,12	23192,8	53343,2	239605,62	9584,2	249189,8

### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

#### 4.4.1 Определение социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населений, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Данная работа эффективна в первую очередь потому, что математическое моделирование загрязнения окружающей среды от автотранспорта имеет большой потенциал в будущем применении. Социальная эффективность исследовательской работы оценена в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Невозможность проведения точного эксперимента в силу большого количества контрольных объектов.	Получение математической модели при помощи численных измерений позволяет с высокой точностью оценить уровень загрязнения воздуха.
Большие затраты времени на постановку эксперимента.	Существенная экономия времени, наглядность и визуализация результатов моделирования.
Реализация дорогостоящих и низкоэффективных природоохранных мероприятий.	Возможность заранее оценить, насколько снизится загрязнение воздуха при реализации планируемых мероприятий, что позволит избежать необоснованных затрат.
Расположение новых транспортных маршрутов без учёта уровня загрязнения воздуха в условиях городской застройки.	Программа позволяет отследить, при каких условиях и на каком расстоянии наблюдается превышение ПДК для загрязняющих примесей, что позволит определить безопасное расположение новых транспортных маршрутов.

### Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 105 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 102 дня; общее количество дней, в течение которых работал научный руководитель, составляет 22 дня;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 249189,8 руб.;

4. Оценка социальной эффективности исследования подтверждает актуальность и востребованность компьютерной программы для моделирования распространения загрязняющих примесей от автотранспорта. Реализация компьютерного кода позволит существенно снизить временные затраты, которые потребовались бы для проведения сложного и длительного эксперимента, при этом точность результатов не будет потеряна. В том числе результаты исследования помогут оценить эффективность природоохранных мероприятий и избежать невыгодных вложений. Мониторинг распространения загрязняющих веществ в условиях города позволит определить безопасное расположение новых транспортных маршрутов.

## **5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **Введение**

Приоритетом в реализации научного исследования является обеспечение безопасности сотрудника. Математическое моделирование загрязнения окружающей среды позволяет дистанционно анализировать распространение загрязняющих примесей в воздухе, что значительно снижает воздействие вредных и опасных факторов на исполнителя. В данном случае, исследование проводилось в корпусе НИ ТПУ, где рабочая зона – это офисное помещение (кабинет) размером 4м\*5м, оборудованное персональным компьютером (1 шт.).

Рабочий процесс предполагает обязательное использование персональной вычислительной машины (ПЭВМ) – персонального компьютера (ПК) и представляет собой контроль за реализацией программного кода, изменение исходных данных для решения разных вопросов задачи и анализ полученных результатов.

### **5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Право работников на труд в безопасных условиях, то есть отвечающим требованиям охраны труда, закреплено в статье 216 Трудового кодекса РФ [27].

Каждый работник имеет право на:

1. рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
2. обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
3. получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующих профессиональных рисках и их уровнях, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
4. отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда до



устранения такой опасности, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами;

5. обучение по охране труда за счет средств работодателя.

В соответствии со статьей 100 ТК РФ режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели: пятидневная с двумя выходными днями, шестидневная с одним выходным днем, рабочая неделя с предоставлением выходных дней по скользящему графику, неполная рабочая неделя.

Оплата и нормирование труда осуществляется в соответствии с разделом IV ТК РФ, в котором отражены государственные гарантии по оплате труда работников, формы и минимальный размер оплаты труда, установление заработной платы, указаны нормы труда и установлено обеспечение нормальных условий работы для выполнения норм выработки.

В соответствии с ТК РФ, работникам могут быть предоставлены гарантии и компенсации за вредные и опасные условия труда. Персонал, занимающийся анализом загрязнения окружающей среды с использованием ПЭВМ, располагается в помещениях офисного типа, где, как правило, воздействие вредных и (или) опасных факторов не превышает допустимых норм. По результатам специальной оценки условий труда за 2022 год в НИ ТПУ в отделении контроля и диагностики ИШНКБ установлен итоговый класс условий труда – 2 (допустимый), следовательно для сотрудников не предполагаются компенсации.

Глава 14 ТК РФ устанавливает требования и ответственность в области защиты персональных данных работника, в соответствии со статьей 86 ТК РФ защита персональных данных работника от неправомерного их использования или утраты должна быть обеспечена работодателем за счет его средств в порядке, установленном настоящим Кодексом и иными федеральными законами.

### **5.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

Рабочее место сотрудника должно быть организовано согласно требованиям, зафиксированных в соответствующих инструкциях [28]:

1. Рекомендуемый проход слева, справа и спереди от стола 500 мм. Слева от стола допускается проход 300 мм;
2. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов;
3. Дизайн ПЭВМ должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4 – 0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики;
4. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы.
5. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления.
6. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию;
7. Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и

воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

## 5.2 Производственная безопасность

Сотрудник, занимающийся анализом загрязнения атмосферного воздуха с применением математического моделирования, большую часть рабочего времени проводит за компьютером. Следовательно, необходимо идентифицировать все возможные вредные и опасные факторы, воздействующие на работника на рабочем месте.

При выполнении работ на персональном компьютере (ПЭВМ) согласно «ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» могут иметь место следующие факторы, указанные в таблице 5.2 [29]:

Таблица 5.2 – Возможные опасные и вредные производственные факторы при работе за ПК

<b>Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)</b>	<b>Нормативные документы</b>
1. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	ГОСТ Р 58698-2019 (МЭК 61140:2016) Защита от поражения электрическим током. Общие положения для электроустановок и электрооборудования
2. Короткое замыкание	ГОСТ Р 50571.4.43-2012/МЭК 60364-4-43:2008 Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока (с Поправкой)
3. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и (или) искусственного освещения	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания
4. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1)
5. Нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса	Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022, с изм. от 11.04.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2023)
6. Длительность сосредоточенного наблюдения	ГОСТ Р 50948-2001 Средства отображения информации индивидуального пользования

### **5.2.1 Поражение электрическим током**

В деятельности исследовательских отделов широко используется электричество для питания компьютерной техники, которая может являться источником опасности. Несоблюдение правил ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» может привести к опасным последствиям [30].

Поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение. Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие. Действие электрического тока на человека приводит к травмам или гибели людей. Для переменного тока частотой 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц, соответственно – 2 В и 0,4 мА, для постоянного тока – 8 В и 1 мА.

К превентивным мерам по предупреждению и устранению поражения электрическим током в помещении офиса можно отнести запрет на использование шнуров питания, изоляция которых имеет небольшие трещины и другие повреждения. Все электрошнуры не должны быть сильно короткими и слишком длинными. Категорически запрещается прибивать их к полу гвоздями либо накрывать линолеумом и другими напольными покрытиями. Также необходимо следить за розетками, вне зависимости, где они установлены, их нельзя перегружать.

Перед допуском к самостоятельной работе оператору ПЭВМ необходимо пройти вводный инструктаж по охране труда, обучение безопасным приемам и методам труда по программе, проверку знаний, в том числе по электробезопасности.

### **5.2.2 Короткое замыкание**

Причиной короткого замыкания является нарушение изоляции в электропроводах и кабелях, вызываемое перенапряжениями, старением изоляции и механическими повреждениями. Из-за этого в короткий промежуток

времени выделяется большое количество тепла в проводниках, из-за чего изоляция начинает гореть и возникает пожар, что может привести к травмированию и даже гибели сотрудников. Неожиданный удар током может вызвать у человека остановку сердца, дыхания; разрывы мышц, поражение мозга, ожоги.

Для реализации защиты от токов короткого замыкания применяются автоматические выключатели (АВ) или, за редким исключением, предохранители. Эти защитные аппараты отключают от питающей электрической сети поврежденный участок (элемент), который послужил причиной возникновения аварийного режима работы, с целью исключения развития аварии и снижения негативных последствий.

Также для снижения риска возникновения короткого замыкания, сотрудники должны использовать только исправную технику, в обратном случае недопустимо ремонтировать ПЭВМ самостоятельно, в том числе нельзя ставить на провода тяжелые предметы, завязывать их в узлы, выдёргивать вилку из розетки, держась за шнур. Важно не допускать попадания воды в зону работы с ПК, а в конце каждой рабочей смены сотрудник обязательно должен выключить ПЭВМ и другие электроприборы.

### **5.2.3 Отсутствие или недостаток необходимого естественного и (или) искусственного освещения**

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток.

Недостаточное освещение рабочего места затрудняет выполнение работы, вызывает утомление, увеличивает риск производственного травматизма. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения сопровождается снижением интенсивности обмена веществ в организме, ослаблением его реактивности, способствует развитию близорукости.

Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 (глава V, таблица 5.25 «Требования к освещению рабочих мест в помещениях общественных зданий, а также сопутствующих им производственных помещениях») указаны в таблице 5.2.3 [31].

Таблица 5.2.3 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Помещения	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г-горизонтальная, В-вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещённое освещение	
		КЕО $e_{н, \%}$		КЕО $e_{н, \%}$	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы	Г – 0,8	3,0	1,0	1,8	0,6
Помещения	Искусственное освещение				
	Освещенность, лк			Показатель дискомфорта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп, %, не более
	При комбинированном освещении		При общем освещении		
	Всего	От общего			
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы	400	200	300	40	15

#### 5.2.4 Отклонение параметров микроклимата

Микроклимат определяется действующими на организм человека показателями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Длительное воздействие на человека неблагоприятных показателей микроклимата ухудшает его самочувствие, снижает производительность труда и приводит к заболеваниям. Низкая температура вызывает охлаждение организма и может способствовать возникновению простудных заболеваний. При высокой температуре — перегрев организма, повышенное потоотделение и снижение работоспособности. Повышенная влажность воздуха затрудняет испарение влаги с поверхности кожи и легких, что ведет к нарушению терморегуляции организма, ухудшению состояния человека, снижению работоспособности. При пониженной влажности – сухость слизистых оболочек верхних дыхательных

путей. Скорость движения воздуха. Человек начинает ощущать движение воздуха при  $V > 0,15$  м/сек. Движение воздушного потока зависит от его температуры. При  $t < 36^{\circ}\text{C}$  поток оказывает на человека освежающее действие, при  $t > 40^{\circ}\text{C}$  неблагоприятное. Работник теряет внимание, что может привести к несчастному случаю, поэтому в организации должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата, установленные ГОСТ 12.1.005-88 [32].

Таблица 5.2.4 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

<b>Оптимальные значения характеристик микроклимата</b>				
Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22 – 24	21 – 25	40 – 60	0,1
Тёплый	23 – 25	22 – 26	40 – 60	0,1
<b>Допустимые значения характеристик микроклимата</b>				
Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	20 – 25	19 – 26	15 – 75	0,1
Тёплый	21 – 28	20 – 29	15 – 75	0,1 – 0,2

### **5.2.5 Нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса**

К психофизиологическим факторам можно отнести: интеллектуальные, эмоциональные и длительные статические нагрузки, монотонность труда, большой объем информации, обрабатываемый в единицу времени, нерациональная организация рабочего места. По окончании рабочего дня зачастую операторы испытывают такие ощущения, как: головная боль, тянущие боли в мышцах шеи, рук и спины, снижение концентрации внимания.

При первых симптомах психического перенапряжения необходимо:

- дать нервной системе расслабиться;
- рационально чередовать периоды отдыха и работы;
- начать заниматься спортом;
- ложиться спать в одно и то же время;
- в тяжелых случаях обратиться к врачу.

Полностью исключить провоцирующие факторы на рабочем месте не удастся, но можно уменьшить их негативное воздействие, обеспечив нервной системе необходимый отдых.

### 5.2.6 Длительность сосредоточенность наблюдения

Визуальные задачи, требующие высокой концентрации, вызывают перенапряжение и спазм мышц. Работа на ПК сопровождается длительным сосредоточенным наблюдением, следствием чего является постоянное напряжение функций зрительного анализатора. Напряженно всматриваясь в монитор, человек реже моргает, и усталость глаз в результате длительной интенсивной работы сопровождается сухостью глазного яблока.

Симптомы перенапряжения зрительного анализатора:

- усталость,
- жжение и боль в глазах,
- размытое изображение,
- двоение в глазах,
- головная боль,
- слезоточивость,
- сухость глаз,
- болезненные ощущения в шее,
- фотофобия — повышенная чувствительность к свету.

Чтобы снизить зрительное напряжение нужно соблюдать визуальные параметры экрана, установленные в главе 5 ГОСТ Р 50948-2001 «Средства отображения информации индивидуального пользования» [33] и представленные в таблице 5.2.6, а также делать регулярные перерывы на зрительную гимнастику.

Таблица 5.2.6 – Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

Параметры	Допустимые значения
Яркость белого поля	Не менее 35 кд/м <sup>2</sup>
Неравномерность яркости рабочего поля	Не более ±20%
Контрастность (для монохромного режима)	3:1
Амплитуда смещения изображения	Не более 2*10 <sup>-4</sup> l



### 5.3 Экологическая безопасность

На данном рабочем месте выявлены предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, а именно:

- воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке предметов вычислительной техники и оргтехники,
- воздействие на гидросферу в результате жизнедеятельности персонала;
- воздействие на атмосферу вследствие выделения при горении ПК токсических веществ, содержащихся в компьютерных компонентах.

Вышедшее из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации. Для оказания наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить специальную процедуру утилизации ПЭВМ и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки. При этом она должна соответствовать процедуре утилизации ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов» [34].

Несоблюдение требований охраны труда по электробезопасности значительно повышает риск возгорания персонального компьютера в рабочей зоне, что может привести к выделению токсичных веществ. Таким образом, чтобы избежать негативного воздействия на атмосферу, необходимо проводить плановые инструктажи на рабочем месте с соответствующей периодичностью для доведения до сотрудника информации о правилах безопасности.

В ходе деятельности работник также создает бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы), который должен быть утилизирован в соответствии с определенным классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние атмосферы, гидросферы и литосферы.

## 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

С учетом специфики работы и наличием вычислительной техники в помещении наиболее вероятная чрезвычайная ситуация – пожар, под которым понимается вышедший из-под контроля процесс горения, обусловленный возгоранием вычислительной техники и угрожающий жизни и здоровью работников.

Причинами возгорания при работе с компьютером могут быть:

1. токи короткого замыкания;
2. неисправность устройства компьютера или электросетей;
3. небрежность оператора при работе с компьютером;
4. воспламенение ПК из-за перегрузки.

В связи с этим, согласно ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования», при работе с компьютером необходимо соблюдать следующие нормы пожарной безопасности [35]:

1. для предохранения сети от перегрузок запрещается одновременно подключать к сети количество потребителей, превышающих допустимую нагрузку;
2. работы за компьютером проводить только при исправном состоянии оборудования, электропроводки;
3. иметь средства для тушения пожара (огнетушитель);
4. установить количество, размеры и соответствующее конструктивное исполнение эвакуационных путей и выходов;
5. обеспечить возможность беспрепятственного движения людей по эвакуационным путям.

Ответственные за безопасность должны проинструктировать персонал и следить за выполнением предписаний. Все сотрудники должны пройти инструктаж по охране труда и следить за выполнением ее предписаний.

### **Выводы по разделу**

В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) рабочее место пользователя ПК относится к помещению без повышенной опасности.

Согласно Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок I группа по электробезопасности распространяется на офисных работников и оформляется за неэлектротехническим персоналом, работающим с электрооборудованием.

Категория тяжести труда по СанПиН 1.2.3685-21 является Ia, энерготраты которой составляют до 139 Вт [31].

Согласно СП 12.13130.2009 офисное помещение, где размещен пользователь, работающий за ПЭВМ, относится к категории В и считается пожароопасным [36]. Такая классификация связана с наличием в офисных помещениях горючих и трудногорючих материалов и веществ, которые при контакте с воздухом горят без образования взрывоопасных смесей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломной работе подробно изучена экологическая проблема загрязнения атмосферного воздуха от автотранспорта в России, проанализировано негативное влияние легковых и грузовых автомобилей на окружающую среду и здоровье человека, а также исследованы действующие меры по снижению вредного воздействия загрязняющих примесей от выхлопных газов машин. По результатам литературного обзора был сделан вывод о необходимости внедрения более эффективных инструментов для разрешения экологической напряженности. Основой дипломной работы является математическое моделирование – один из самых современных подходов к решению экологических и инженерных задач. Такой способ мониторинга состояния атмосферного воздуха отличается высокой точностью при низких материальных и временных затратах.

В результате, в дипломной работе была реализована математическая модель, которая учитывает основные факторы, влияющие на распределение загрязняющих веществ, выбрасываемых автомобилями. Решение двумерного уравнения диффузии позволило определить поля концентрации загрязняющих веществ.

Для того чтобы получить визуализацию результатов, была разработана физико-математическая постановка задачи распространения загрязняющих веществ от автотранспорта. Проведены численные расчеты по определению распределения концентрации загрязняющих примесей от автотранспорта в условиях города в зависимости от скорости ветра, интенсивность движение и состава транспортного потока

Использование простейшей модели турбулентности, основанной на балансе между прохождением энергии турбулентности и ее диссипацией в каждой точке потока, позволяет исключить неопределенности при выборе числа Рейнольдса. Расчеты охватывают все экспериментально наблюдаемые режимы течения в уличном каньоне. Основываясь на результатах расчетов, можно утверждать, что происходит быстрое снижение концентрации по высоте.

Границы уличного каньона характеризуются наибольшей концентрацией загрязняющих веществ.

Поскольку реальное строительство, особенно в новых микрорайонах, является неустойчивым, предпринимались попытки рассматривать развитие как пористую среду, характеризующуюся одним параметром – удельной плотностью. Течение в застройке в этом случае определялось одномерным приближением. Выяснилось, что при уменьшении удельной плотности от бесконечно большого до маленького сначала происходит увеличение содержания загрязняющих веществ в уличном каньоне, и затем происходит уменьшение. Это связано прежде всего с уменьшением интенсивности вихрей, которые происходят в уличном каньоне, так как значительное количество низкоскоростного воздуха проникает в верхнюю часть застройки, а затем вихри постепенно начинают исчезать. Стабильность этого эффекта очень важна для режима сплошной шероховатости. Согласно расчетам, проникновение загрязняющих веществ в здание является низким.

В работе изучено влияние метеорологических условий на распределение загрязняющих веществ. По полученным результатам можно сделать вывод, что при увеличении скорости ветра наблюдается более интенсивный перенос вредных примесей, вследствие чего наблюдается завихрение. В том числе, была проанализирована зависимость распределения загрязняющих веществ от интенсивности движения автотранспорта. При увеличении транспортного потока вредные примеси распространяются на большее расстояние и выносятся из уличного каньона.

Таким образом, полученная модель позволяет проанализировать распределение загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы от автотранспорта в условиях городской застройки. Исследование применимо для других участков города Томска, а также позволяет исследовать распространение не только СО, но и других вредных примесей, таких как  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_x$  и сажи.

Практическое применение исследование находит в оценке эффективности природоохранных мероприятий. Программный код позволяет изменять

исходные данные, например, транспортный состав и интенсивность движения. Также полученная математическая модель может быть применима для оценки расположения жилых домов и автомагистралей в новых микрорайонах.

Исследование прошло апробацию на следующих конференциях:

- XI Международная конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых учёных "Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее" в Томском политехническом университете (диплом II степени),
- XVIII (L) Международная научная конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей" в Кемеровском государственном университете (диплом II степени),
- Всероссийская молодёжная научная конференция студентов «Все грани математики и механики» в Томском государственном университете (диплом III степени).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Всемирная организация здравоохранения : официальный сайт. – URL: <https://www.who.int/ru> (дата обращения 10.02.2023). – Текст : электронный;
2. Дегодя, Е.Ю. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду / Дегодя Е.Ю., Мальцева Е.В. – Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т.6, №1. – С. 34–37;
3. Национальные проекты России : официальный сайт. – URL: <https://национальныепроекты.рф> (дата обращения 10.02.2023). – Текст : электронный;
4. ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» Основные источники загрязнения атмосферного воздуха: // Портал муниципальных образований : сайт. – 2010-2023. – URL: <https://muob.ru/aktualno/news/glavnye-novosti/884905.html>;
5. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2021 году» / Под ред. А. О. Кульбачевского. – Москва, 2022. – 234 с.
6. Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. – Москва, 1999-2023. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 10.02.2023) – Текст : электронный;
7. Российская Федерация. Законы. Об охране атмосферного воздуха : Федеральный закон №96-ФЗ : [принят Государственной Думой 2 апреля 1999 года]. – 40 с. – ISBN 978-5-703080-24-5;
8. Петрунин, В.В. Плата за негативное воздействие на окружающую среду в 2006 году // Финансы. – 2006. – №4. – С. 25–30;
9. Трефилов, М. Дизельная угроза: врачи признают риск // Autonews. – 2012. – URL: <https://www.autonews.ru/news/58259d649a7947474311f7d3> (дата обращения: 12.20.2023) – Текст : электронный;
10. ГН 2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: дата введения 1998-02-04. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000525>. – Текст : электронный;
11. Сердюкова, А. Ф. Влияние автотранспорта на окружающую среду / А. Ф. Сердюкова, Д. А. Барабанщиков. — Текст : непосредственный // Молодой

ученый. — 2018. — № 25 (211). — С. 31-33. — URL: <https://moluch.ru/archive/211/51590/> (дата обращения: 15.02.2023);

12. Тарасова, В.В. Влияние автомобильных дорог на экологическую безопасность близлежащих территорий / Тарасова В.В., Архипова И.А., Реховская Е.О. — Текст : электронный. // Экологические проблемы региона и пути их разрешения. — 2019. — С.78–81. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38536870&pf=1> (дата обращения: 15.02.2023). — Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

13. Стуканов, В. А. Влияние автотранспорта на состояние окружающей среды крупного промышленного города / Стуканов, В. А., Козлов А. Т. ; Военный авиационный инженерный университет. — Воронеж : Вестник ВГУ. — 2012. — № 1. — С.168–175;

14. Шишелова, Т.И. Влияние шума на организм человека / Шишелова Т.И., Малыгина Ю.С., Нгуен Суан Дат. — Успехи современного естествознания. — 2009. — № 8. — С. 14-15; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=14048> (дата обращения: 17.02.2023);

15. Андрюхова, А. Режим «черного неба» вновь ввели в Томске. — Текст : электронный // Томский Гидрометцентр. — 2023. — URL: <https://news.vtomske.ru/news/196874-rejim-chernogo-neba-vnov-vveli-v-tomske> (дата обращения: 17.02.2023);

16. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды российской федерации в 2021 году». — Текст : электронный // Министерство природных ресурсов и экологии РФ : [сайт]. — 2021. — URL: <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/doklad/atmosfernyu-vozduh/vybrosy-zagryaznyayuschih-veschestv/> (дата обращения 17.02.2023);

17. Загорский, А. Европа пересядет на электрокары. — Текст : электронный // Коммерсантъ : [сайт]. — 2022. — 29 окт. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5644661> (дата обращения: 18.02.2023).

18. Роль зеленых насаждений в городе. — Текст : электронный // МБУ «Управление экологии города Чебоксары» : [официальный сайт]. — URL: <https://ekologia.cap.ru/sitemap.aspx?id=583240> (дата обращения 17.02.2023);



19. Звонарев, С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С.В. Звонарев. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 112 с. — ISBN 978-5-7996-2576-4;

20. Виды математических моделей. Классификация и примеры математических моделей. — Текст : электронный // Энциклопедия пожаробезопасности : [сайт]. — URL: <https://rt82.ru/the-fire-fighting-units/vidy-matematicheskikh-modelei-klassifikaciya-matematicheskikh-modelei-v/> (дата обращения: 20.02.2023);

21. Приказ Минприроды РФ от 06.06.2017 №273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»;

22. Хаширова, Т.Ю., Моделирование загрязненности атмосферного воздуха / Хаширова Т.Ю., Акбашева Г.А., Шакова О.А. [и др.] : Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова. — Нальчик : Фундаментальные исследования. — 2017. — №8. — С. 325–330;

23. Погода в Томске : сайт. — Томск, 2007–2023. — URL: <https://pogoda.vtomske.ru/tomsk/webcams> (дата обращения 04.03.2023);

24. Перминов, Валерий Афанасьевич. О численном решении задачи загрязнения окружающей среды с помощью MATLAB / В. А. Перминов, А. В. Румянцев // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2015 г., Томск: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.] ; ред. кол. В. В. Литвак [и др.]. — 2015. — Т. 2 — С. 297-299;

25. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. — Новосибирск: Наука, 1992. — 408 с. — ISBN: 5-02-029708-9;

26. Патанкар, С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики вязкой жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 312 с. — ISBN 5-7046-0898-1;

27. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 197-ФЗ : [принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года]. – 288 с. – ISBN 978-5-04-177126-3;
28. ИПБОТ 360-2008 Инструкция по промышленной безопасности и охране труда для операторов и пользователей ПЭВМ и работников, эксплуатирующих ПЭВМ и видеодисплейные терминалы (ВДТ) (актуализированная редакция);
29. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация;
30. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением № 1);
31. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания;
32. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1);
33. ГОСТ Р 50948-2001 Средства отображения информации индивидуального пользования;
34. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов;
35. ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность. Общие требования;
36. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1).