

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Математическое моделирование распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ в окружающей среде

УДК 504.5:622.85:622.349.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1EM51	Сартбаев Мааматкул Женишбекович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико- математических наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Баннова Кристина Алексеевна	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	Кандидат технических наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭБЖ	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для оптимизации методов и способов обеспечения безопасности человека от воздействия различных негативных факторов в техносфере
P2	Осваивать современные методы моделирования состояния окружающей среды, прогнозирования изменения ее состояния под влиянием техногенных факторов
P3	Идентифицировать процессы и разрабатывать их рабочие модели, интерпретировать математические модели в нематематическое содержание, определять допущения и границы применимости модели, математически описывать экспериментальные данные и определять их физическую сущность, делать качественные выводы из количественных данных, осуществлять машинное моделирование изучаемых процессов
P4	Прогнозировать, определять зоны повышенного техногенного риска и зоны повышенного загрязнения <i>и создавать модели новых систем защиты человека и среды обитания</i>
P5	Анализировать, оптимизировать и применять современные информационные технологии при решении научных задач
P6	Моделировать, упрощать, адекватно представлять, сравнивать, использовать известные решения в новом приложении, качественно оценивать количественные результаты
P7	Проводить <i>инновационные</i> инженерные исследования опасных природных и техногенных процессов и систем защиты от них, включая <i>критический анализ данных из мировых информационных ресурсов, формулировку выводов в условиях неоднозначности</i> с применением <i>глубоких</i> знаний и <i>оригинальных</i> методов в области современных информационных технологий, современной измерительной техники и методов измерения.
<b>Универсальные компетенции</b>	
P9	С применением глубоких знаний осуществлять технико-экономические расчеты мероприятий по повышению безопасности

P10	К анализу и синтезу, критическому мышлению, обобщению, принятию и аргументированному отстаиванию решений с использованием <i>глубоких фундаментальных и специальных</i> знаний, аналитических методов и <i>сложных моделей в условиях неопределенности</i>
P11	Применить <i>глубокие</i> знания в области проектного <i>менеджмента</i> для ведения <i>инновационной</i> инженерной деятельности с учетом юридических аспектов в области техносферной безопасности.
P12	<i>Активно владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде, включая разработку документации, презентацию и защиту результатов <i>инновационной</i> инженерной деятельности.
P13	Эффективно работать индивидуально, а также в качестве <i>руководителя группы</i> с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области техносферной безопасности, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P14	Демонстрировать <i>глубокое знание</i> правовых, социальных, экологических и культурных аспектов <i>инновационной</i> инженерной деятельности, <i>компетентность</i> в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P15	Понимать необходимость и уметь <i>самостоятельно учиться</i> и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой ЭБЖ

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / С.В. Романенко  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
1EM51	Сартбаеву Мааматкулу Женишбековичу

Тема работы:

Математическое моделирование распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ в окружающей среде	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	01.03.2017 1290/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Литературные данные по проблематике радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ, их математическому моделированию, нормативно-техническая документация.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения хвостохранилищ</li> <li>2. Выбор метода математического моделирования</li> <li>3. Применение метода контрольного объема для получения дискретного аналога</li> <li>4. Разработка математическая постановки задачи о распространении радионуклидов в</li> </ol>

	приземном слое атмосферы под действием ветра 5. Задание исходных данных и параметров 6. Разработка численной методики решения задачи 7. Численное решение задачи о распространении радионуклидов 8. Решение задачи об определении уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды для различных расстояний от хвостохранилищ 9. Исследования влияния скорости ветра на распределение уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кандидат экономических наук Баннова К.А.
«Социальная ответственность»	Кандидат технических наук Сечин А.А.
По иностранному языку	Старший преподаватель Данейкина Н. В.

**Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

2 Физическая и математическая постановка задачи
2.1 Постановка задачи
2.2 Метод решения

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико-математических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM51	Сартбаев Мааматкул Женишбекович		

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



Институт неразрушающего контроля  
 Направление подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
 Уровень образования: магистратура  
 Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности  
 Период выполнения (осенний/весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
---------------------------------

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

Срок сдачи студентом выполняемой работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела модуля/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
5.02.2017	Введение	<b>10</b>
10.02.2017	1. Обзор литературы	<b>10</b>
25.02.2017	2. Физическая и математическая постановка задачи.	<b>15</b>
10.03.2017	2.1. Постановка задачи.	<b>10</b>
20.03.2017	2.2. Метод решения задачи	<b>10</b>
5.04.2017	3. Результаты численных расчетов. 3.1. Результаты численных расчетов распределения концентрации радиоактивного загрязнения	<b>15</b>
10.05.2017	4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	<b>10</b>
17.05.2017	5. Раздел «Социальная ответственность»	<b>10</b>
25.05.2017	Заключение	<b>10</b>

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико- математических наук		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭБЖ	Романенко Сергей Владимирович	Доктор химических наук		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНИНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,  
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>		
1EM51	Сартбаеву Мааматкулу Женишбековичу		
<b>Институт</b>	<b>ИНК</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭБЖ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	20.04.01 «Техносферная безопасность»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ, определение возможных альтернатив проведения научных исследований
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, расчет бюджета
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Сегментирование рынка
2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
3. Матрица SWOT
4. Морфологическая матрица
5. Временные показатели проведения научного исследования
6. График проведения и бюджет НИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

**Дата выдачи задания по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент	Баннова Кристина Алексеевна	Кандидат экономических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM51	Сартбаев Мааматкул Женишбекович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1EM51	Сартбаеву Мааматкулу Женишбековичу

<b>Институт</b>	<b>ИНК</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭБЖ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	20.04.01 «Техносферная безопасность»

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Описание рабочего места (лаборатории биогеохимии и радиозкологии каб.№307 «Биолого-почвенный институт НАН КР» г. Бишкек.
--	--

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

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).</li> </ul>	<p>Анализ вредных факторов производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шум, микроклимат);</li> <li>- опасных проявлений факторов производственной среды (электрической и пожарной природы);</li> <li>- негативных воздействий на окружающую природную среду;</li> <li>- чрезвычайных ситуаций.</li> </ul> <p>Анализ опасных факторов производственной среды (механические опасности, электробезопасность, пожаробезопасность);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- предлагаемые средства защиты.</li> <li>- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ воздействия хвостохранилищ на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия хвостохранилищ на литосферу (отходы).</li> </ul>



<p>(отходы);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Возможные ЧС на объекте: замыкание электрической цепи, и как следствие пожар.</p> <p>Превентивные меры по предупреждению ЧС: применение изоляции, недоступность токоведущих частей, изоляция электрических частей от земли.</p> <p>Действия в результате возникшей ЧС и ликвидации ее последствий должны быть описаны каждой инструкции охраны труда.</p> <p>1).</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</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>Эффективный и безопасный труд возможен только в том случае, если производственные условия на рабочем месте отвечают всем требованиям международных стандартов в области охраны труда.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сечин Андрей Александрович	Кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ЕМ51	Сартбаев Мааматкул Женишбекович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 123 с., 37 рис., 27 табл., 30 источников.

Ключевые слова: хвостохранилище, математическое моделирование, метод контрольного объёма, радиоактивное загрязнение, площадь поверхности источника.

Объектом исследования является: радиоактивное загрязнение от хвостохранилищ с учётом уровня радиоактивного загрязнения и метеорологических условий. Предмет исследования – математические модели распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ.

Цель работы – Разработка математической модели распространения переноса радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ с учетом метеорологических условий и уровня радиоактивного загрязнения местности.

Метод математического моделирования позволяет адекватно описывать распространения радионуклидов в приземном слое атмосферы от хвостохранилищ при переносе пыли под действием ветра.

В результате исследования процесс возникновения и переноса распространение радиоактивного загрязнения описан в рамках математической постановки задачи, т.е. учитывается взаимное влияние направления ветра и площади поверхности хвостохранилищ. Изучено влияние метеоусловий и других факторов на процесс распространения радиоактивной пыли в приземном слое атмосферы.

Степень внедрения: разработанная в работе математическая модель переноса и распространения радиоактивного загрязнения под действием ветра опубликована в сборниках научных конференций.

Экономическая эффективность/значимость работы: Использование данной модели позволит более точно рассчитать перенос радионуклидов и оценить уровень радиоактивного загрязнения местности.

В будущем планируется: создание более удобного интерфейса, 3D восприятие ситуации.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

**Хвостохранилище** – комплекс специальных сооружений и оборудования, которые предназначены для хранения или захоронения радиоактивных, токсичных и других отходов горноперерабатывающей промышленности.

**Горные отвалы** – масса пород и некондиционных руд, извлеченных на поверхность земли при ведении горных работ.

**Математическое моделирование** – средство изучения реального объекта, процесса или системы путем их замены математической моделью, более удобной для экспериментального исследования с помощью компьютера.

**Радиоактивное загрязнение** – присутствие радионуклидов техногенного происхождения в окружающей среде, которое может привести к облучению в индивидуальной дозе более 0,001 зиверта в год.

**Контрольный объем** – замкнутая область течения жидкости или газа, для которой производится поиск полей макроскопических величин (например, скорости, давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих определенным законам, сформулированным математически.

### **Обозначения и сокращения**

**ХВХ** – хвостохранилища;

**ПДК** – предельно допустимая концентрация.

## **Нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1.ГОСТ Р 1.5 – 2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

2.ГОСТ 2.104 – 2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи.

3.ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.

4.ГОСТ 2.106 – 96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.

5.ГОСТ 2.301 – 68 Единая система конструкторской документации. Форматы.

6.ГОСТ 3.1102 – 2011 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.

7.ГОСТ 3.1105 – 2011 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения.

8.ГОСТ 7.0.5 – 2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка.

9.ГОСТ 7.1 – 2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание.

10.ГОСТ 7.9 – 95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация.

11.ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	17
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	20
1.1 . Математическое моделирование физических процессов ветровой эрозии с поверхности хвостохранилища .....	20
1.1.1 Перенос пыли. Модель ветровой эрозии.....	20
1.2 Экологические аспекты влияния хвостохранилища на окружающую среду .....	23
1.3 Базовые способы формирования хвостохранилища .....	24
1.4 Влияние ветровых нагрузок на процесс пыления хвостохранилища.....	25
1.5 Анализ факторов влияющих на формирование пылевых облаков с поверхности хвостохранилища .....	28
1.6 Моделирование воздушных потоков на поверхности хвостохранилища ..	29
1.7 Анализ процесса осаждения пылевых частиц на выходе из хвостохранилища .....	35
ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	44
2.1 Постановка задачи.....	44
2.2 Метод решения.....	46
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ .....	57
3.1 Результаты численных расчетов распределения концентрации радиоактивного загрязнения.....	57
ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	70
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	70
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	70
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	71
4.1.3 SWOT – анализ.....	72

4.2	Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	74
4.3	Планирование научно-исследовательских работ	76
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования	76
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ	76
4.3.3	Разработка графика проведения научного исследования	78
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	86
	Заключение по главе	89
	<b>ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ</b>	<b>90</b>
5.1	Вредные и опасные факторы при работе с компьютером	90
5.2	Экологическая безопасность	101
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	103
	Заключение по главе	104
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>105</b>
	<b>СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ</b>	<b>106</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>107</b>
	<b>Приложение А</b>	<b>110</b>



## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные радиоэкологические проблемы урановых хвостохранилищ и отвалов в Кыргызстане являются наследием интенсивно развиваемой ранее уранодобывающей и ураноперерабатывающей отраслей промышленности бывшего СССР. После распада Советского Союза разработки большинства месторождений ураносодержащих руд в Кыргызстане были завершены. Однако после закрытия основных рудников столкнулись с проблемой безопасного управления урановыми отходами, закрытием шахт и необходимостью восстановления территорий, где ранее располагались урановые объекты.

На сегодняшний день охрана окружающей среды в Кыргызской Республике является актуальной задачей. На территории Кыргызской Республики расположено 92 хвостохранилища и горных отвалов, из них в ведении МЧС КР находятся 33 хвостохранилища и 25 горных отвалов с общим объемом отходов 11,9 млн. м<sup>3</sup> [1]. Все эти объекты содержат, преимущественно, неорганические соединения, тяжелые металлы, радиоактивные элементы. Многие хвостохранилища и отвалы расположены в активных сейсмических районах, селеопасных участках, а также возле берегов рек.

Одним из серьезных источников загрязнения окружающей среды являются хвостохранилища. При скорости ветра более 4 м/с сухая поверхность хвостохранилища становится источником интенсивного выделения пыли. Мелкие частицы пыли отрываются от поверхности и поднимаются высоко вверх под действием аэродинамической силы восходящих ветровых потоков. При скорости ветра более 10 м/с концентрация пыли в воздухе над хвостохранилищем и на расстоянии в несколько километров от него может в десятки и сотни раз превышать предельно-допустимые концентрации (ПДК). Под действием аэродинамической силы ветра мелкие песчаные частицы переносятся на значительные расстояния, загрязняя окружающие территории.

Исследования по вопросам переноса радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ в окружающей среде и оценка уровней дополнительного радиоактивного загрязнения **являются актуальной проблемой.**

**Предмет исследования** – математические модели распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ.

**Объектом исследования** является радиоактивное загрязнение от хвостохранилищ с учётом уровня радиоактивного загрязнения и метеорологических условий.

**Цель работы:** Разработка математической модели распространения и переноса радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ с учетом метеорологических условий и уровня радиоактивного загрязнения местности.

**Задачи:**

Разработать математическую модель переноса радионуклидов в приземном слое атмосферы под действием ветра.

Разработать методику численного решения задачи распространения радионуклидов в приземном слое атмосферы.

Выполнить математическое моделирование процессов переноса и распространения радиоактивной пыли с помощью компьютерной программы.

Определить размеры зоны загрязнения от хвостохранилищ в окружающей среде. Провести анализ полученных результатов.

**Научная новизна:**

Произведено моделирование переноса радиоактивных загрязяющих примесей в приземном слое атмосферы под действием ветра и определены уровни дополнительного радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ.

**Практическая значимость** данной работы заключается в разработке математической модели процессов переноса и распространения радиоактивной пыли от хвостохранилищ. Эта модель позволит оценить дополнительные уровни радиоактивного загрязнения и тем самым повысить экологическую безопасность.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы рассматривались на Международной научно-практической конференции "Совершенствование прогнозирования и управления стихийными бедствиями" и VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность».

## **ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

### **1.1 Математическое моделирование физических процессов ветровой эрозии с поверхности хвостохранилища**

#### **1.1.1 Перенос пыли. Модель ветровой эрозии**

Изучение явления ветровой эрозии с поверхности хвостохранилища является актуальным. Ветровая эрозия – это второй после водной фильтрации фактор распространения загрязнений [2]. Под ветровой эрозией (дефляцией) понимается совокупность взаимосвязанных процессов отрыва, переноса (пыли) и отложения частиц ветром. Однако большая или меньшая подверженность почв ветровой эрозии определяется не одним лишь ветром, а также совокупностью таких факторов как режим атмосферных осадков, температура, рельеф, гранулометрический и агрегатный состав почвы и другие [2].

Вышеописанные факторы позволяют выделить места, подверженные дефляции. В 30-ых годах работы Р.А. Багнольда ознаменовали собой кардинальный сдвиг в понимании системы ветровой эрозии [3]. Проблема зависимости «ветер/песок» была рассмотрена Багнольдом как один из видов аэродинамики. В его работе лабораторные и полевые эксперименты в Ливийской пустыне проводились с помощью аэродинамической трубы. Багнольд, проведя эти испытания, предположил, что крупные завихрения не играют значительной роли в поддержании песка в воздухе и что перемещение песка происходит примерно в пределах метра от поверхности земли. Полученные Багнольдом многие идеи и результаты вошли в основу для последующих исследований проблемы ветровой эрозии [3].

В настоящее время существует много различных моделей ветровой эрозии. Они разработаны для решения проблемы, связанной с прогнозированием ветровой эрозии, и позволяют найти более надежные и экономически выгодные методы защиты от этой эрозии. Для этого нужно глубокое изучение процесса ветровой эрозии, которое усложнено ее разномасштабностью. В основе процессов ветровой эрозии лежат разные

механизмы. Эта проблема решается учеными из разных стран, пытаясь найти наиболее правильный подход. В итоге разработанные модели ветровой эрозии внедряются в противоэрозионные мероприятия [3].

При описании основных физических процессов ветровой эрозии существует необходимость в проведении сравнительного анализа различных моделей, для того чтобы выявить наиболее полное и комплексное решение этой задачи. Сравнительный анализ различных моделей ветровой эрозии определяет правильность направления развития исследований основных ее закономерностей, что делает возможным использование этих моделей в практических целях на Карабалтинском ХВХ.

Для предварительного описания модели ветровой эрозии с поверхности ХВХ был произведен анализ двух моделей [3]. Первая модель создана американскими учеными Робертом С. Андерсоном и Бернардом Халлетом. Их работа получила название «Общая модель переноса частиц почвы ветром» и является обобщением общепринятых представлений и подходов в ветровой эрозии [4]. Вторая модель разработана российскими учеными из МГУ Г.П. Глазуновым и В.М. Гендуговым и изложена в работе «Механизмы ветровой эрозии» [5]. В разработке российской модели успешно используются методы, которые ранее не применялись, и она является более физической. Вышеназванные модели являются фундаментальными в области эрозиоведения и поэтому заслуживают пристального внимания.

Эти две модели различаются кардинально в фундаментальных понятиях и подходах к изучению механизмов ветровой эрозии почв, хотя имеют общие выводы. Российские ученые использовали в своей модели представление о вихревой природе сил, отрывающих частицу от поверхности. Все дальнейшие рассуждения строятся благодаря нему. А американские ученые пренебрегают этим представлением о вихревой природе сил при построении своей модели.

Работа Г.П. Глазунова и В.М. Гендугова [5] посвящена выявлению закономерностей выдувания на микро и макроуровнях, исследованию структуры почво-воздушного потока и обобщению полученных результатов в виде физически содержательной модели потерь почвы от ветровой эрозии.

Рассмотрим подробно эту работу. В ней получены следующие результаты:

- вывод уравнения выдувания почвы;
- определение физического смысла параметра массообмена в уравнении выдувания;
- решение задачи о скорости вылета почвенной частицы с поверхности под действием ветра в поверхностном слое почвы;
- вывод теоретического уравнения траектории почвенных частиц в воздухе;
- определены понятие и способ нахождения критической скорости ветра, при которой начинается горизонтальный полет почвенной частицы;
- выяснение структуры почво-воздушного потока;
- решение задачи о возможных потерях почвы от ветровой эрозии с бесконечного поля.

Работа Андерсона и Халлета [4] отличается от работы российских ученых тем, что выбран другой подход к изучению механизмов ветровой эрозии. Он заключается в том, что проводят четкую границу между процессами скачкообразного передвижения частиц и движением частиц в подвешенном состоянии. Это и является их недостатком, так как для этих двух процессов находятся отдельные решения, а в российской работе – общее решение для обоих процессов.

Теперь рассмотрим подробно американскую работу [4]. В ней получены следующие результаты:

- выявление закономерностей механизмов ветровой эрозии на микро и макроуровнях;
- исследование структуры почво-воздушного потока;
- исследование начальных условий, при которых происходит отрыв частицы от поверхности;
- обсуждение природы сил действующих на частицу;
- вывод уравнения зависимости концентрации и массового потока от определенной высоты для частиц передвигающихся скачкообразно;
- вывод различных эмпирических закономерностей, требующих проверки;
- вывод уравнения для плотности вероятности скорости вылета, распределение которой имеет прямую зависимость с распределением длины скачка;
- вывод уравнения для общей концентрации частиц в определенном объеме для процесса переноса частиц в подвешенном состоянии.

В работе [5] был использован метод перехода от микроуровня к макроуровню при решении проблемы математического описания процесса ветровой эрозии, а именно анализируется движение отдельной частицы, и процесс описывается в рамках законов механики многофазных сред.

## **1.2 Экологические аспекты влияния хвостохранилища на окружающую среду**

Одними из серьезных источников загрязнения окружающей среды на горнодобывающих предприятиях являются хвостохранилища. В процессе намыва от хвостохранилищ образуются обезвоженные участки площадью десятки и сотни гектаров, находящиеся в таком состоянии по несколько месяцев в году [6]. В летние периоды поверхность хвостохранилищ покрывается растительностью. Сухие хвосты представляют собой рыхлый песчаный материал, между частицами которого нет устойчивых адгезионных связей. При скорости ветра более 4 м/с сухая поверхность хвостохранилища

становится источником интенсивного выделения пыли. Мелкие частицы пыли отрываются от поверхности и поднимаются высоко вверх под действием аэродинамической силы восходящих ветровых потоков. При скорости ветра более 10 м/с концентрация пыли в воздухе над хвостохранилищем и на расстоянии в несколько километров от него может в десятки и сотни раз превышать предельно-допустимые концентрации (ПДК) [6].

Проблема снижения пылевыведения от хвостохранилищ все еще находится в стадии исследования и поисков рационального решения. Предложено множество технических решений этой проблемы, однако их широкое использование на горных предприятиях сдерживается большими материальными затратами и недостаточно высокой эффективностью. Решением проблемы борьбы с пылением на законсервированных хвостохранилищах является их рекультивация. Эффективные мероприятия по предотвращению пыления проводятся в обязательном порядке на заполненных и завершенных хвостохранилищах, заключающееся обычно в рекультивации дамб и обвалования их поверхности [6].

### **1.3 Базовые способы формирования хвостохранилища**

Аэродинамические способы борьбы с пылением поверхности хвостохранилищ являются традиционными.

Сущность этих способов заключается в том, что происходит изменение аэродинамического режима хвостохранилища, при этом скорость ветрового потока противодействует переходу частиц в аэрозольное состояние (устройство лесозащитных полос и др.) [7].

Аэродинамические способы борьбы с пылением предназначены для хвостохранилищ с высотой от 20 до 30 м, которая сравнима с высотой крон деревьев. Высокие защитные экраны, которые устанавливаются возле стенок хвостохранилища, также не позволяют распространяться пыли за пределы ограниченной зоны.



Недостатками этих способов является:

- высокие расходы на сооружение защитных экранов;
- низкая механическая устойчивость;
- долговечность использования только в благоприятных условиях.

#### **1.4 Влияние ветровых нагрузок на процесс пыления хвостохранилища**

Режим ветра местности, формирующийся на различных участках рельефа под влиянием циркуляционных процессов в атмосфере, имеет прямое воздействие на интенсивность пыления хвостохранилища. Роза ветров в каждом регионе зависит от времени года и имеет различную интенсивность. Например, по данным центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в районе хвостохранилища среднемесячные скорости ветра составляет 0,6-1,3 м/сек. [6]. Наибольшая наблюдавшаяся скорость ветра достигала 20 м/с. Среднегодовая скорость ветра составляет 3 м/с. Подъемные силы ветра для одинаковых частиц, но с разной плотностью, имеют различные значения [6].

Величина динамического напора восходящего воздушного потока влияет на аэродинамическую силу ветра, которая поднимает частицу. Аэродинамическая сила ветра определяется по формуле:

$$F_a = C_z = \frac{\rho v^2}{2} S_M; \quad (1.1)$$

где  $c_z$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $c_z=1,0...1,5$ ; более точные расчеты осуществляют по формуле Л.С. Клячко:

$$C_z = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}; \quad (1.2)$$

$Re$  – число Рейнольдса,  $Re = \frac{d \cdot v}{\gamma}$ ;

$\gamma$  – кинематическая вязкость воздуха,  $m^2/c$ ;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость воздуха, м/с;

$S_m$  – миделево сечение частицы, м<sup>2</sup>.

При приравнении аэродинамической подъемной силы к силе веса, получается выражение для расчета скорости восходящего потока, поднимающего частицу:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{gd}{C_z} + \frac{\rho_T}{\rho}}; \quad (1.3)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м;

$g$  – ускорение свободного падения;

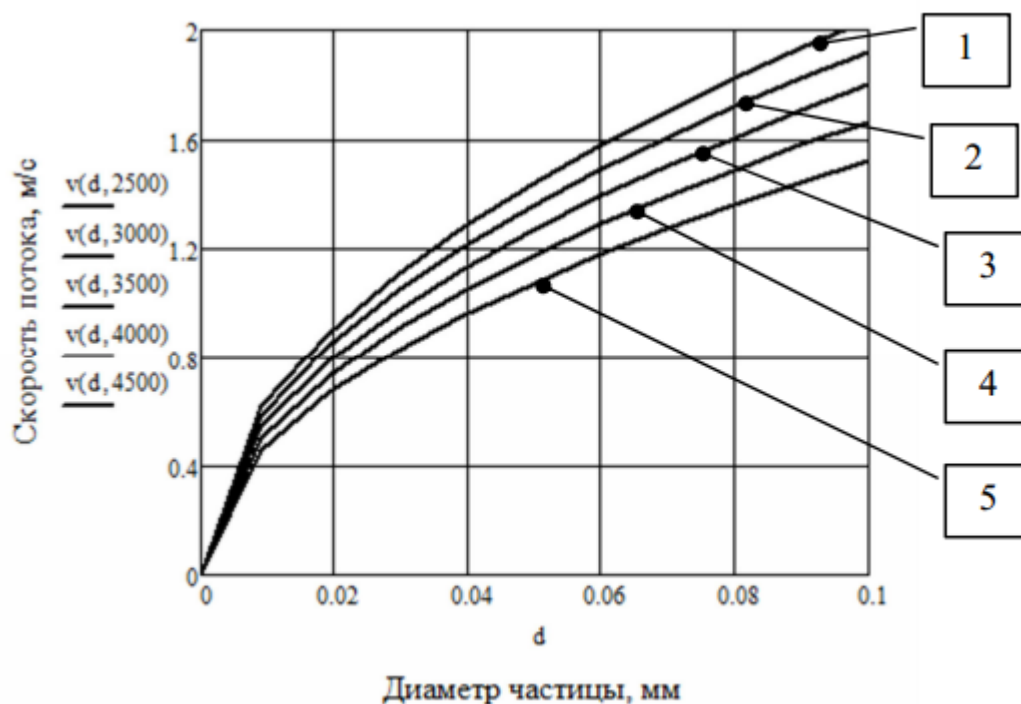
$\rho_T$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

Далее выполняется оценка скорости восходящего потока, поднимающего частицу диаметром 0,0766 мм, плотностью 3100 кг/м<sup>3</sup> и воздушным потоком плотность 1,18 кг/м<sup>3</sup>, при коэффициенте аэродинамического сопротивления 1,2. Расчет по формуле (1.3) приводит к результату:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{9,81 \cdot 0,00766 \cdot 10^{-3}}{1,2} \cdot \frac{3100}{1,18}} = 1,48 \text{ м/с}$$

На рисунке 1.1 графически изображена зависимость скорости подъема частицы при различной плотности ветрового потока. Более крупные частицы, а также частицы с большой плотностью труднее поднимаются вверх.

Для предотвращения пыления важно, что скорость подъема напрямую зависит от скорости восходящего потока. Эту величину можно изменять различными способами, например, изменением угла наклона поверхности пляжей [6].



1)  $\rho_T=4500$  кг/м<sup>3</sup>; 2)  $\rho_T=4000$  кг/м<sup>3</sup>; 3)  $\rho_T=3500$  кг/м<sup>3</sup>; 4)  $\rho_T=3000$  кг/м<sup>3</sup>; 5)  $\rho_T=2500$  кг/м<sup>3</sup>;

**Рисунок 1.1 – Скорость взметывания частицы при различных плотностях [6]**

К сожалению, невозможно избежать резких порывов ветра высокой скорости и на большой высоте. Именно ввиду повышенных ветровых нагрузок появляется основная масса загрязнений атмосферного воздуха в области хвостохранилищ, из-за того, что за короткое время за счет фильтрации и испарения хвосты интенсивно высыхают. В процессе высыхания связывающие и удерживающие силы ослабевают и под действием ветра частицы легче отрываются от поверхности. За неделю хвост практически полностью высыхает и поддается выветриванию даже при скорости ветра в 2-5 м/с [14].

Законодательство в природоохранной области гласит, что контроль за состоянием атмосферного воздуха может осуществляться на уровнях [15]:

- оценка достаточности санитарно-защитной зоны по расчетам рассеивания загрязняющих веществ;

– государственный контроль территориальных органов комитета природных ресурсов;

– производственный мониторинг и организация проведения замеров независимыми лабораториями.

Несмотря на непрерывный контроль над состоянием атмосферы вокруг хвостохранилища проблема снижения выбросов вредных веществ остается актуальной и требующей более эффективного решения

### **1.5 Анализ факторов влияющих на формирование пылевых облаков с поверхности хвостохранилища**

На горных предприятиях в ходе разработки и реализации проектных решений при эксплуатации хвостового хозяйства необходимо учитывать экономические и экологические факторы, связанные распространением пылевых загрязнений [8,9].

Источники пылевых загрязнений располагаются на гребнях и откосах плотины, отвалах и с поверхности хвостохранилища. В среднем, интенсивное пыление от указанных источников приходится на неблагоприятные метеорологические условия в течение пяти месяцев в году, в весенне-летнем периоде. В холодные периоды пылевыведений от этих источников не наблюдается. Первый источник пыления может быть устранен на долгосрочный период времени путем укрепления поверхности, нанесения плодородной земли и засева растительностью.

Источниками пылеобразования на хвостохранилище являются высохшие поверхности, намытые из несвязных грунтов и открытые поверхности ограждающих сооружений (гребни и откосы дамб и плотин).

В нормальных климатических условиях при скорости ветра менее 3 м/с функционирование хвостохранилища удовлетворяет установленным нормам ПДК. Однако при неблагоприятных метеоусловиях необходимы дополнительные меры по пылеподавлению, что представляет собой актуальную

техническую задачу. Для недопущения экстремальных ситуаций, с точки зрения загрязнения атмосферного воздуха, необходимо вести регулярные наблюдения за состоянием хвостохранилища, т.е. определять влажность поверхности материала и вести постоянные замеры концентрации пыли на границе санитарной зоны и на этой основе выполнять технологические мероприятия по предотвращению выделения пыли в атмосферу [6,8,9].

### **1.6 Моделирование воздушных потоков на поверхности хвостохранилища**

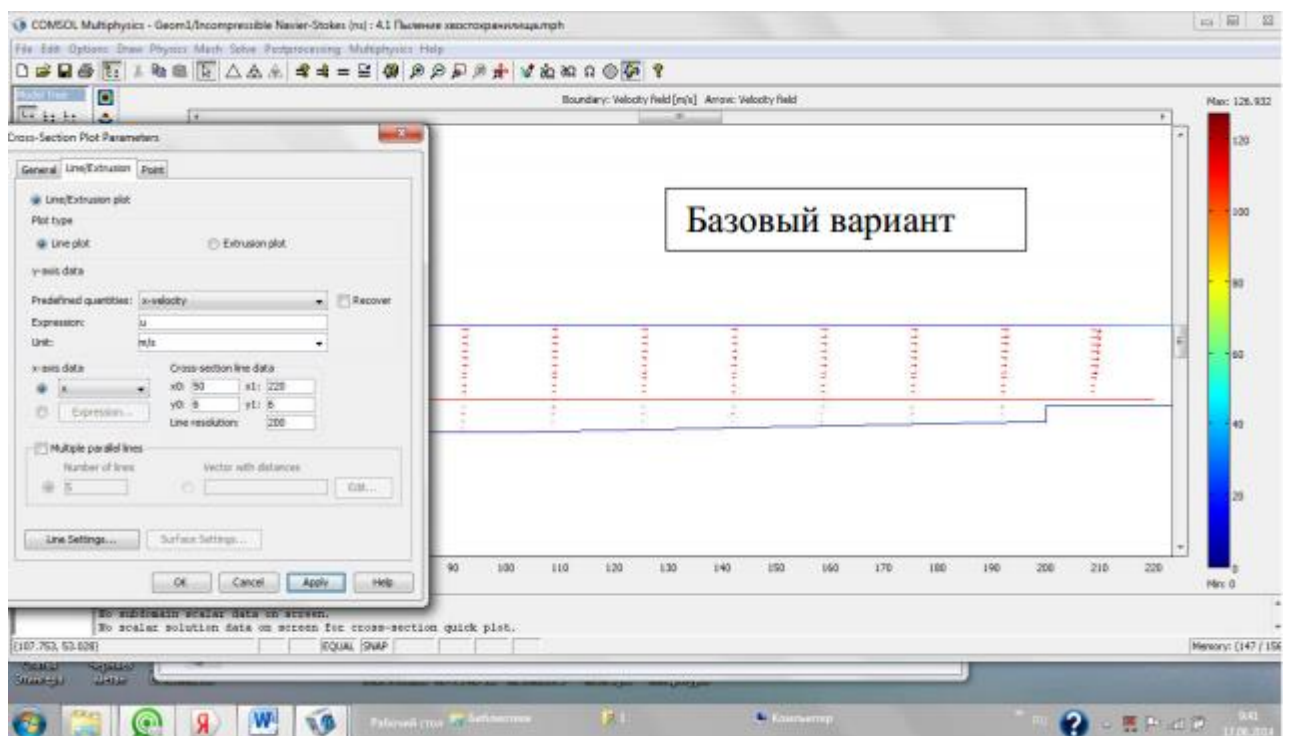
Пыление на хвостохранилищах возникает на участках намывных отсеков, покрытых с поверхностью, на откосах ограждающих дамб и плотин. Вредная техногенная пыль выносится с поверхности таких объектов в жаркий засушливый период при скорости воздушного потока более 4 м/с.

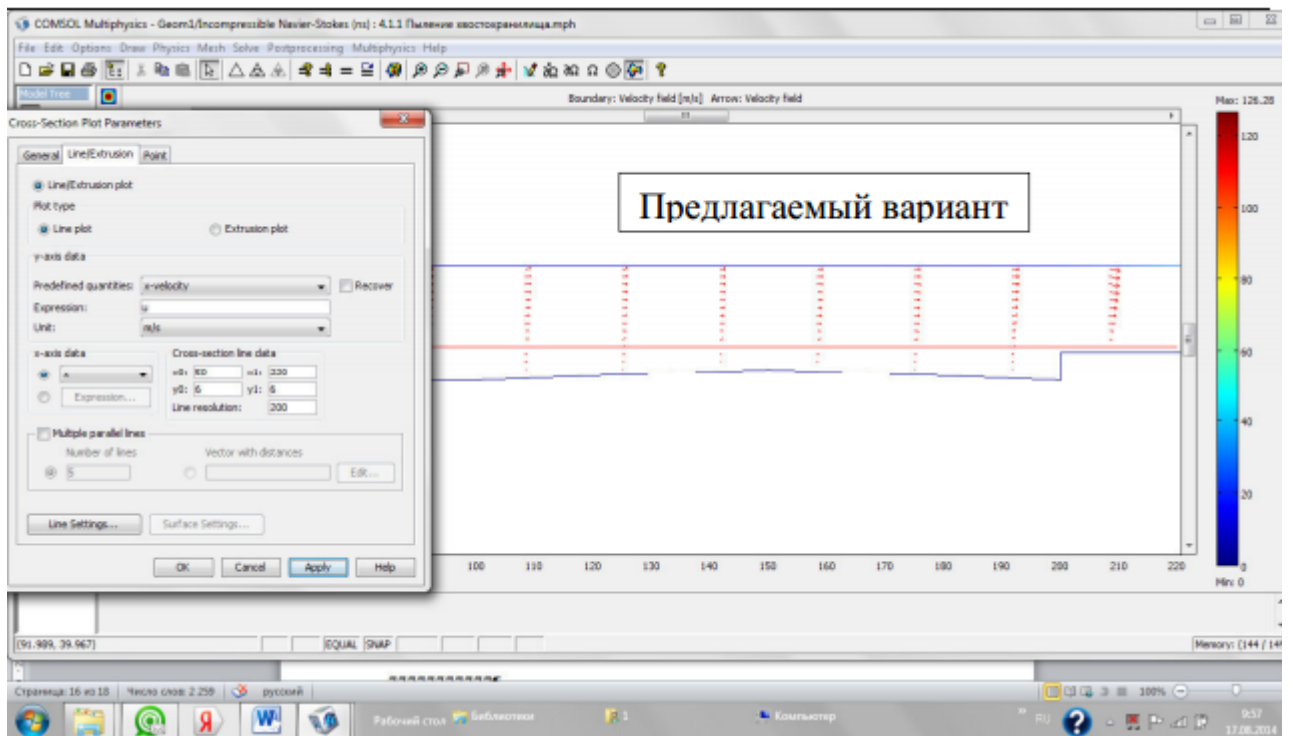
Актуальной инженерной задачей является управление аэродинамикой воздушных потоков над поверхностью хвостохранилища, позволяющей снизить пыление. Одним из хорошо известных и апробированных на практике путей решения задачи является размещение по периферии хвостохранилища высоких защитных экранов, позволяющих изменить направление воздушных потоков и снизить вынос пыли. Оптимизацию этого и других технических решений можно осуществлять на основе методов компьютерного моделирования.

При компьютерном моделировании часто пользуются средствами интерактивной среды COMSOL Multiphysics, предназначенной для описания множества физических процессов [10,11]. Методика моделирования использует фундаментальные наработки в области математической физики и базируется на методе конечных элементов. Благодаря встроенным физическим режимам, коэффициенты дифференциальных уравнений в частных производных задаются в виде базовых физических свойств. Предусмотрена форма задания начальных и граничных условий поставленной задачи. Для анализа перемещения воздушных потоков над поверхностью хвостохранилища воспользуемся физической моделью на основе физических уравнений Навье-Стокса [12,13].

Граничные условия задачи задаются в виде различия атмосферных давлений слева и справа. Воздух перемещается под действием горизонтального градиента давлений величиной  $10^{-6}$  Па/м, который обеспечивает горизонтальную скорость воздуха до 6 м/с. Поверхность хвостохранилища является твердой и не деформируется под действием воздушного потока. В граничных условиях это условие записывается как «wall».

На рисунке 1.2 представлена геометрическая модель двух сравниваемых вариантов:





**Рисунок 1.2 – Моделирование скорости воздушного потока на песчаном пляже в базовом и предлагаемом технологических вариантах [6]**

Исходные физические свойства воздушного потока, учитываемые в расчете, представлены в таблице 1.1 Именно эти свойства входят в дифференциальное уравнение Навье-Стокса, в установившемся режиме движения.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Параметр	Значение
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,18
Вязкость воздуха, Па·с	$1,79 \cdot 10^{-5}$
Атмосферное давление, Па	$10^5$
Градиент давления воздушного потока, Па/м	$10^{-6}$

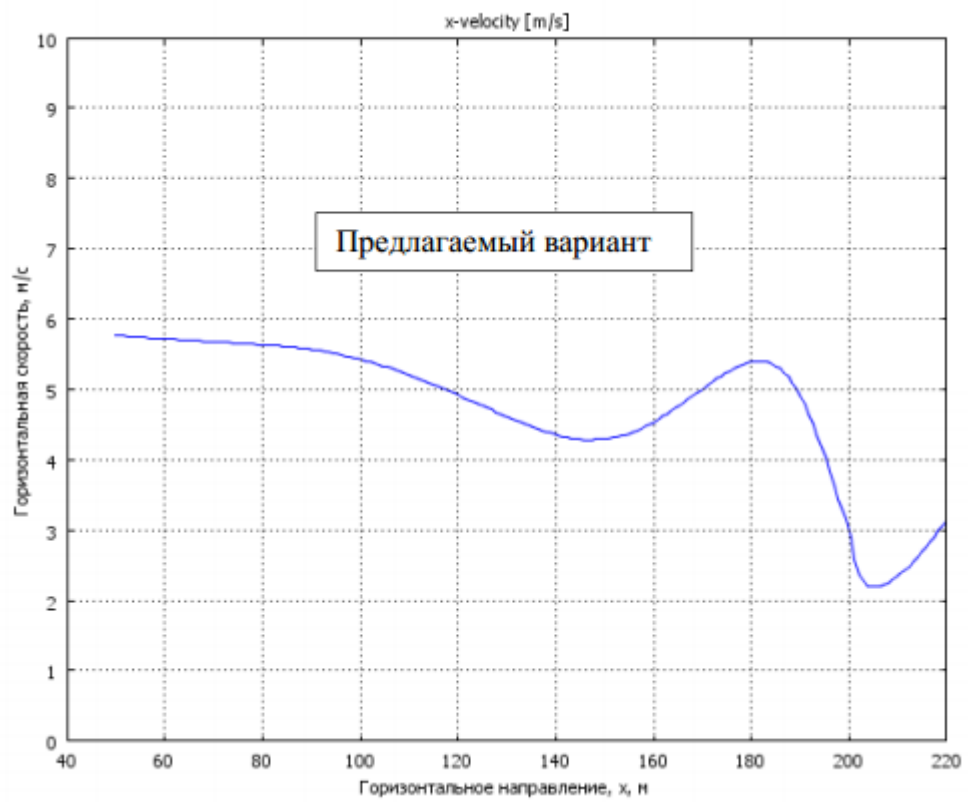
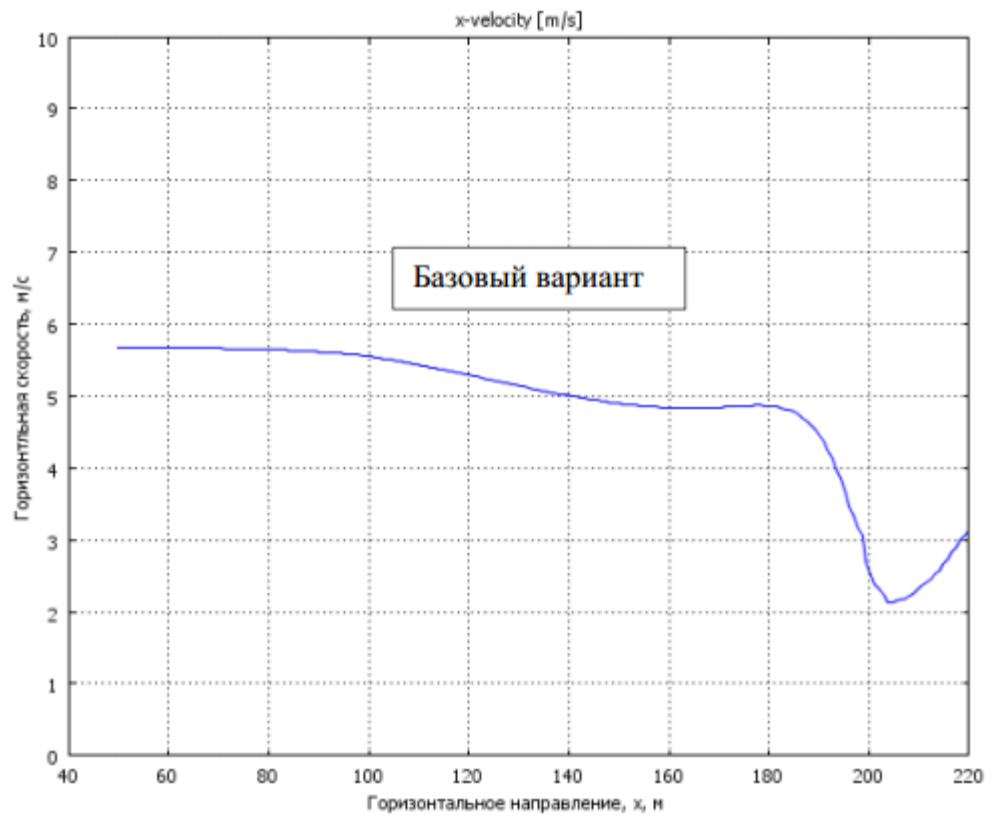
На рисунке 1.3 представлены для сравнения две графические зависимости горизонтальной скорости вдоль горизонтального направления на

высоте 1 м над береговой дамбой, возвышающейся над сухим пляжем. Из графиков прослеживается различие в эпюрах горизонтальных скоростей. В точке с координатами (180; 6), т.е. на выходе из сухого пляжа, в предложенном варианте скорость составляет 5,5 м/с, а в базовом 5,0 м/с. Следовательно, частица пыли в воздушном потоке, в предложенном варианте, будет выноситься из хвостохранилища с более высокой скоростью. Но это произойдет при условии, что пыль поднимется вверх [6].

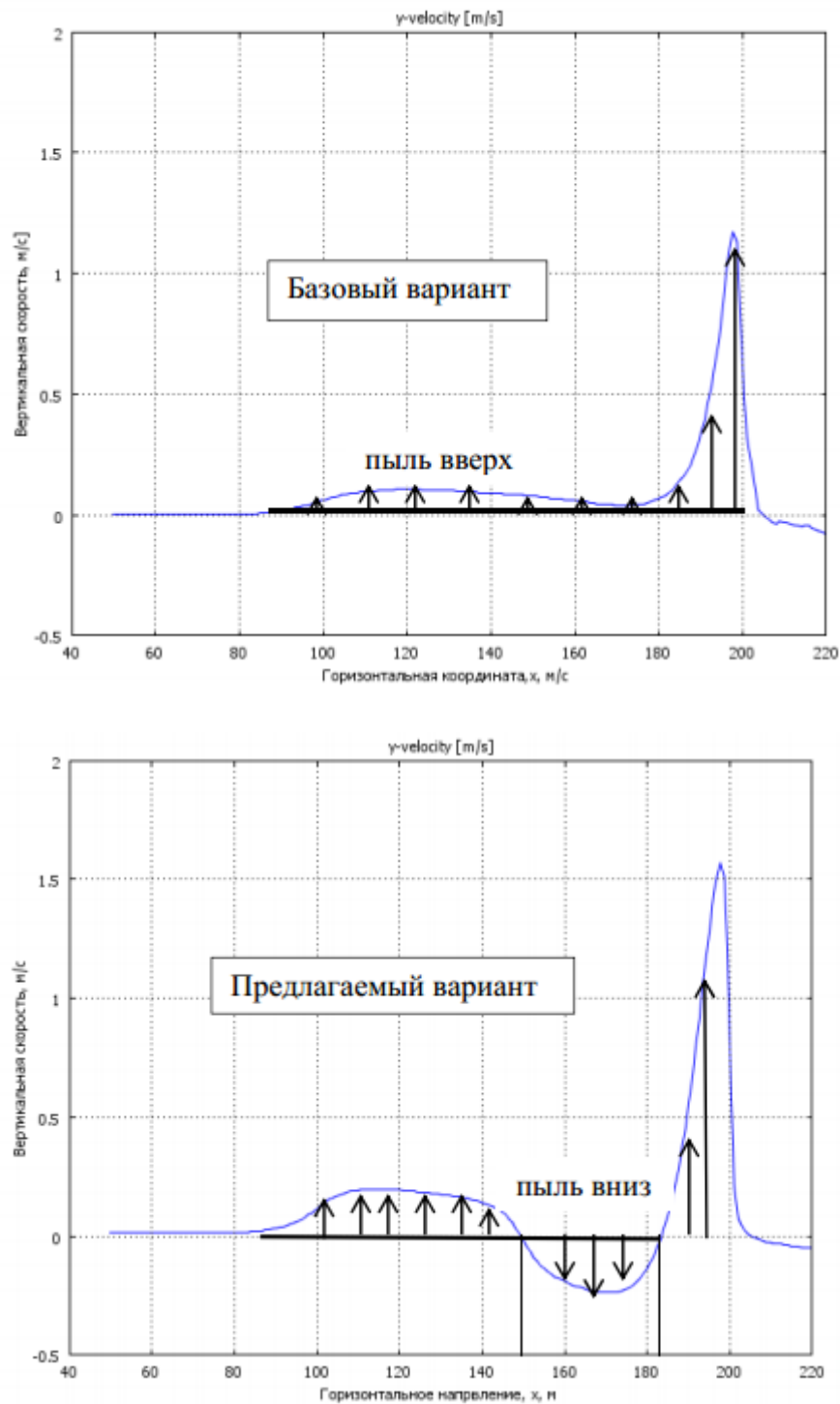
Как показано на рисунке 1.4 в предложенном варианте на участке перед дамбой вертикальная скорость потока будет направлена вниз и будет, таким образом, направлять пылевые частицы на участок перед дамбой, как в аэродинамическую ловушку. На рисунке 1.4 это участок длиной 150 м от координаты (150,6) до координаты (190, 6). Длина участка осаждения пыли составляет 40 м и этот участок приходится на участок пляжа, с углом наклона противоположным базовому варианту [6].

Таким образом, предложенный технологический вариант формирования поверхности наливного хвостохранилища, в ее прибрежной части, помимо гидравлической ловушки для связующих веществ реализует режим аэродинамической ловушки для частиц песка, поступающей с сухой части пляжа. Аналогичная картина с аэродинамической ловушкой выполняется также при других и более высоких скоростях воздушного потока. что свидетельствует об общей закономерности, характерной для предлагаемого варианта формирования наливного хвостохранилища [6].





**Рисунок 1.3 – Горизонтальная скорость потока вдоль песчаного пляжа в сравниваемых вариантах [6]**



**Рисунок 1.4 – Вертикальная скорость воздушного потока вдоль песчаного пляжа в сравниваемых вариантах [6]**

В предлагаемом варианте имеется участок скоростей с направлением скорости вниз. Таким образом, эффект осаждения пыли потоком, ПЫЛЬ ВНИЗ ПЫЛЬ ВВЕРХ направленным вниз срабатывает в обоих случаях: при наличии и отсутствии ветрового экрана [6].

## **1.7 Анализ процесса осаждения пылевых частиц на выходе из хвостохранилища**

Аэродинамическая ловушка, образованная в результате направленного уклона с поверхности хвостохранилища в направлении к дамбе должна обеспечивать осаждение твердых минеральных частиц пыли, размеры которых изменяются от 10 мкм и до 1 мм. Необходимо обосновать такие геометрические параметры ловушки, в том числе длину прибрежной части и угол наклона поверхности, при которых будет исключен вылет пылевых частиц за пределы хвостохранилища. На рисунке 1.5 показана модель поперечного сечения пляжа и в виде горизонтальных линий, исследуемые сечения на предмет эюры скоростей [6].

Для вертикальных скоростей (рис. 1.6) выполняется отмеченная ранее закономерность о формировании направленного воздушного потока вниз на поверхности пляжа. Чем выше расположено рассматриваемое сечение, тем больше скорость нисходящего потока. Эюра горизонтальных скоростей имеет особенность – скорость на входе в прибрежный уклон все же немного понижается, что также является положительным фактором с точки зрения осаждения пыли [6].

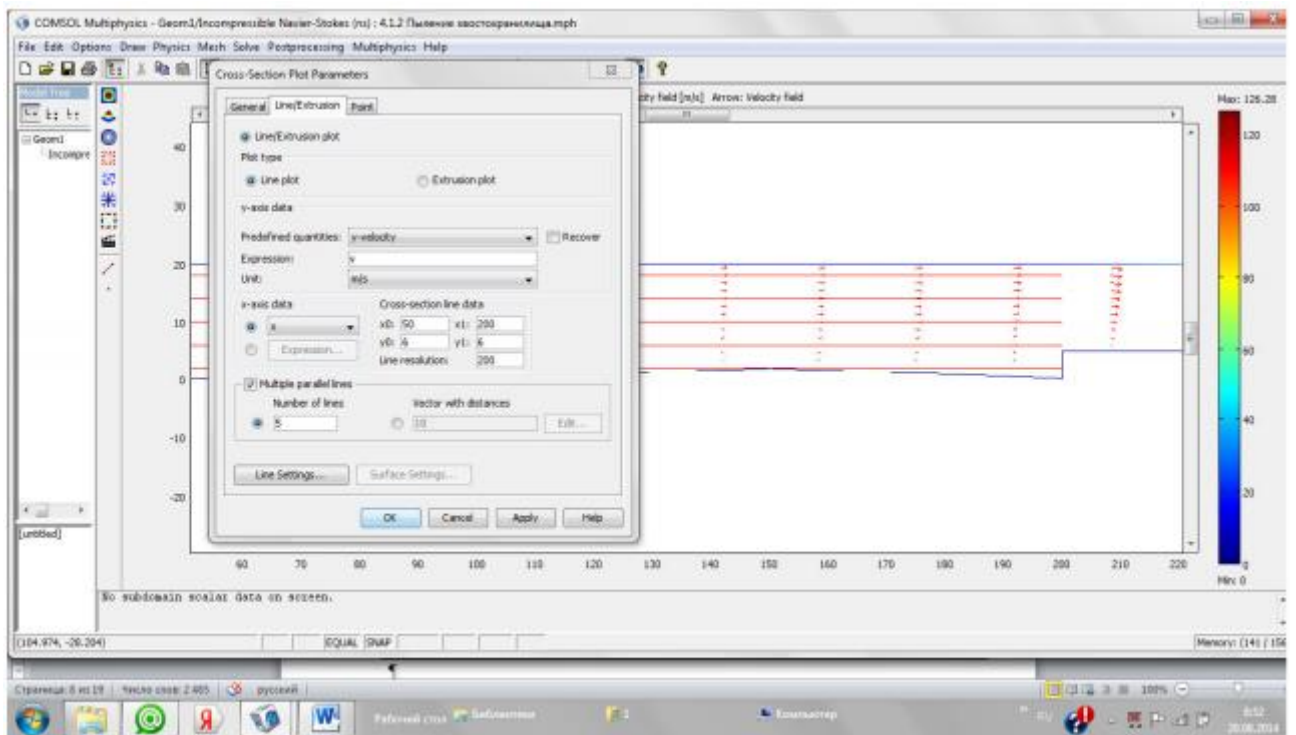


Рисунок 1.5 – Моделирование скоростей в горизонтальных сечениях [6]

На рисунке 1.6 и 1.7 показаны эпюры скоростей в сечения над пляжем.

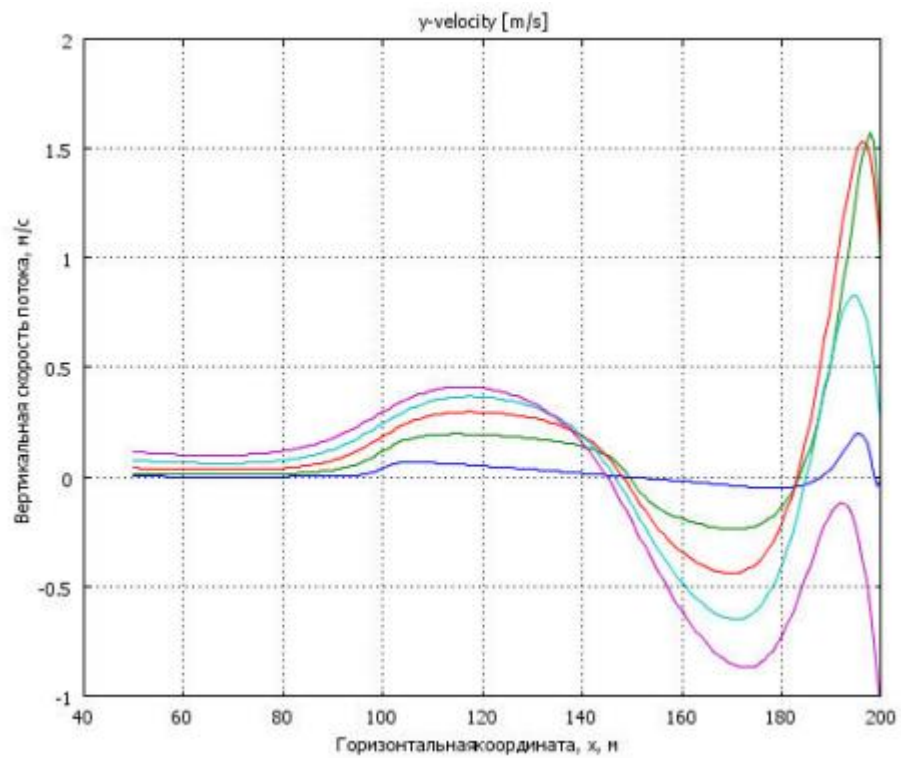


Рисунок 1.6 – Эпюра вертикальных скоростей в различных сечениях [6]

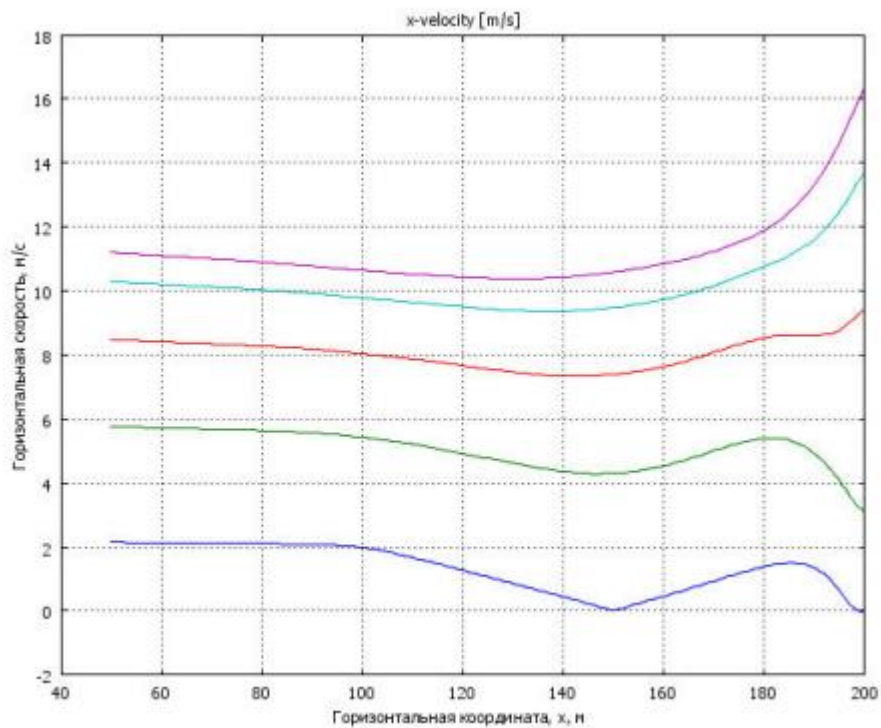


Рисунок 1.7 – Эпюры горизонтальных скоростей в различных сечениях [6]

На рисунке 1.8 показано направление исследуемого вертикального сечения потока.

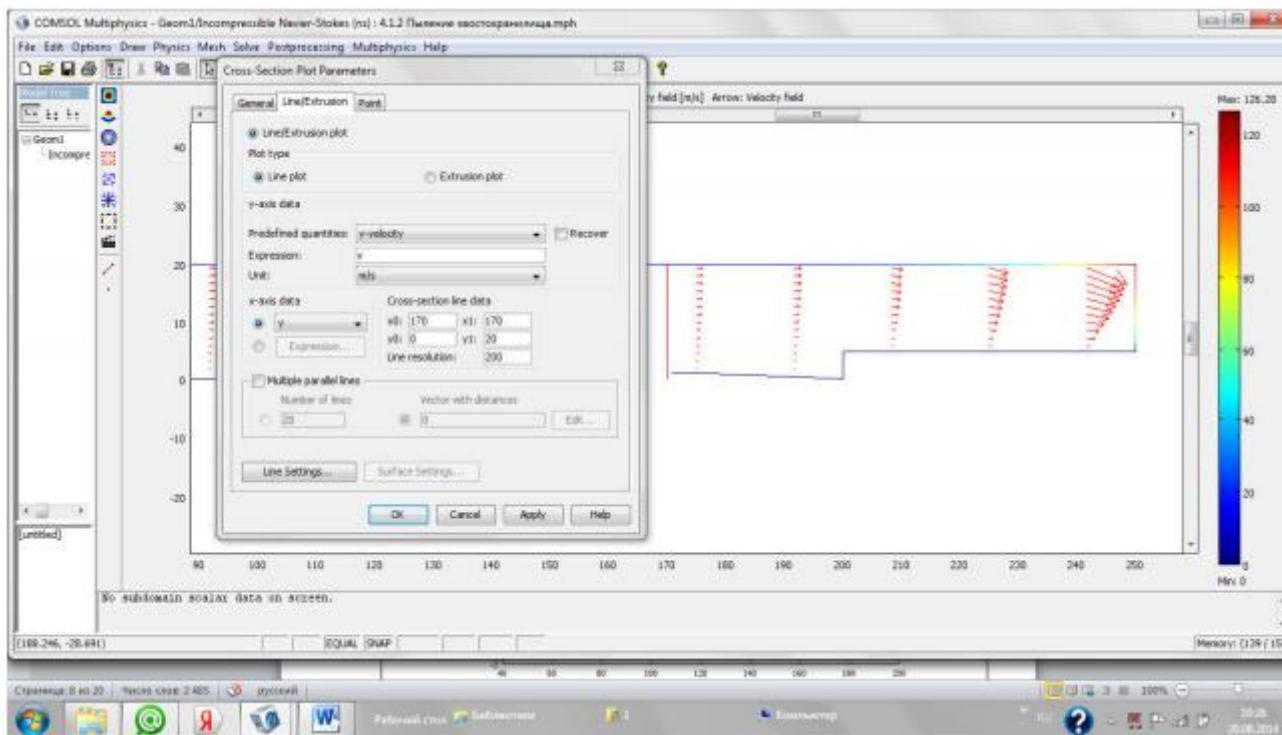
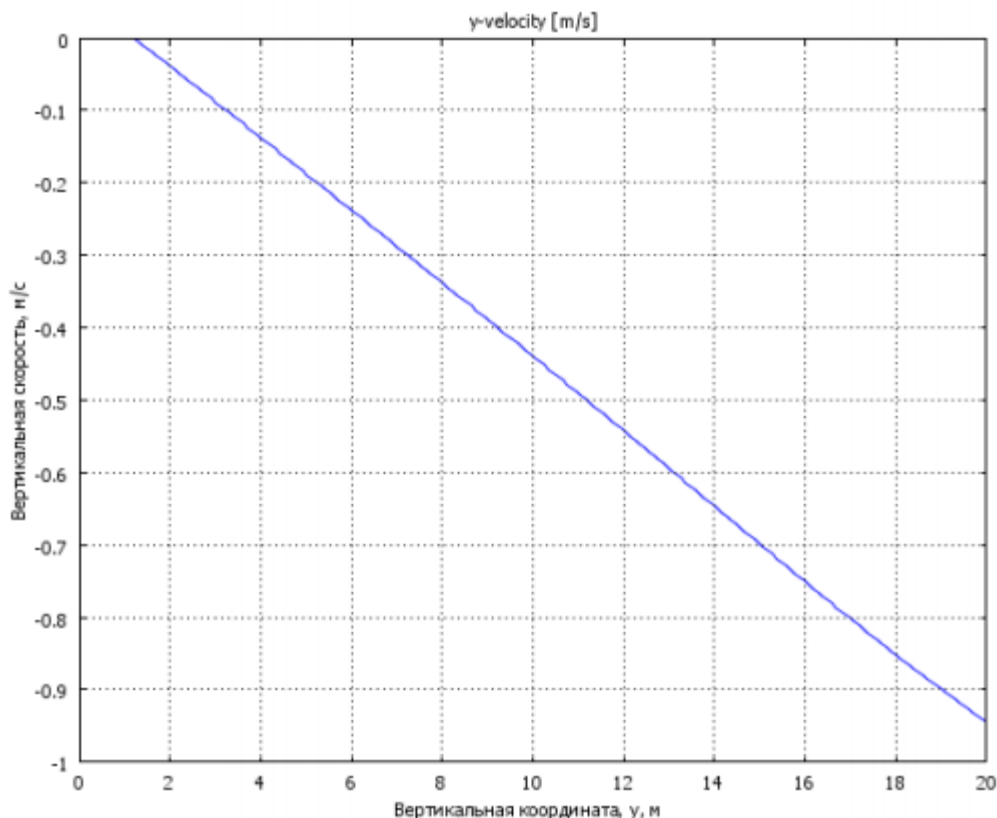


Рисунок 1.8 –Исследуемое вертикальное сечение воздушного потока [6]

На рисунке 1.9 показано распределение нисходящей вертикальной скорости по высоте потока. На самой поверхности пляжа скорость в соответствии с граничными условиями задачи равна нулю, а с высотой возрастает. В последующих расчётах, с некоторым запасом, принимается, что средняя скорость нисходящего потока составляет 0,3 м/с [6].



**Рисунок 1.9 – Вертикальная скорость потока над пляжем [6]**

Далее рассматриваются закономерности движения частицы в потоке воздуха. Аэродинамическая сила при числах Рейнольдса менее единицы находится по формуле Стокса. В рассматриваемом случае числа Рейнольдса более 100 и поэтому принимаем квадратичный закон для силы сопротивления, в соответствии с которым сила пропорциональна динамическому напору. Уравнение движения частицы записывается в горизонтальном и вертикальном направлениях. В соответствии со вторым законом Ньютона, соответственно,

получается:

$$m \frac{dv_y}{dt} = -F_{ax}; \quad (1.4)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = mg - F_{ay}; \quad (1.5)$$

где  $m$  – масса частицы;  $m = \rho_2 \frac{\pi d^3}{6}$ ;

$d$  – диаметр частицы;

$\rho_2$  – плотность частицы, для кварцита  $\rho_2=3300$  кг/м<sup>3</sup>;

$V_x$  и  $V_y$  – горизонтальная и вертикальная скорости частицы в воздушном потоке;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$F_{ax}, F_{ay}$  – аэродинамическая сила потока:

$$F_{ax} = \frac{c\rho_1[V_x - U_x(x,y)]}{2} S_M; \quad (1.6)$$

$$F_{ay} = \frac{c\rho_1[U_y(x,y) - V_y]}{2} S_M; \quad (1.7)$$

$U_x(x,y)$  и  $U_y(x,y)$  – горизонтальная и вертикальная составляющая скорости воздуха в общем случае;

$C$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, для шероховатой частицы  $C=1,1$ ;

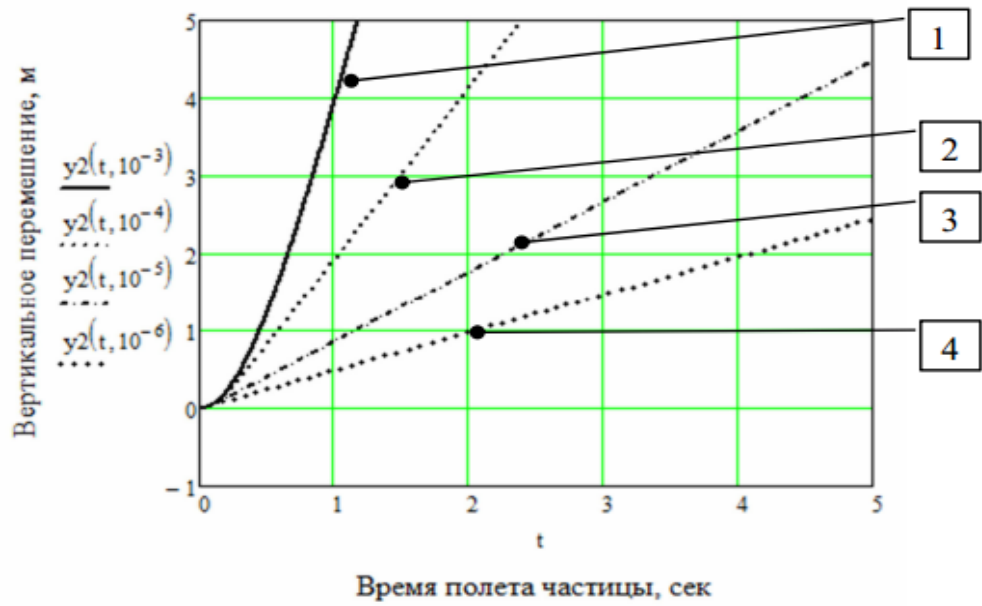
$S_M$  – миделево сечение частицы,  $S_M = \frac{\pi d^2}{4}$ ;

$\rho_1$  – плотность воздуха,  $\rho_1 = 1,18$  кг/м<sup>3</sup>

На рисунке 1.10 представлены результаты расчетов величины горизонтального перемещения частиц, попавших в зону осаждения, как в аэродинамическую ловушку, в зависимости от их размеров. При скорости горизонтального движения частицы равной 5 м/с участок длиной 50 м частица пролетает за 10 сек. На графиках выполнены расчеты в диапазоне времен до 5 сек, при средней скорости вертикального воздушного потока вниз со скоростью 0,3 м/с и при условии, что начальная вертикальная скорость движения частицы равна нулю ( $V_0 = 0$ ). Из графиков следует, что чем крупнее частица, тем за более короткое время полета она осаждается.

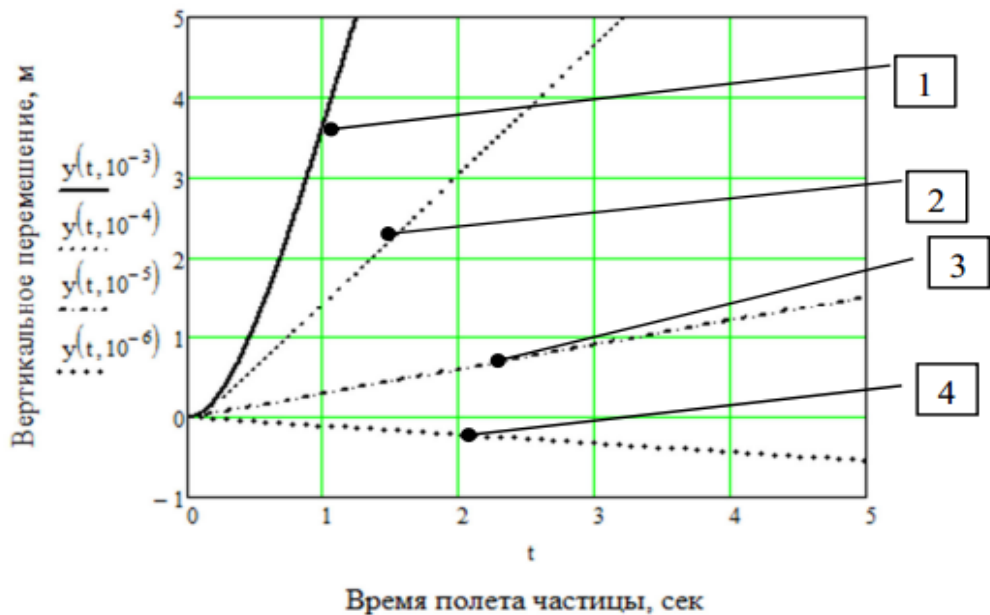
Например, частица диаметром 1 мм расстояние, по направлению вниз, равное 3 м, преодолевает менее чем за секунду. То есть такие частицы с пляжа хвостохранилища при наличии береговой дамбы высотой 5 м - вылететь не способны. Тот же самый вывод распространяется на частицы диаметром 0,1 мм и 0,01 мм. Эти мелкие частицы останутся на глубине аэродинамической ловушки. Что касается совсем мелких частиц диаметром 0,001 мм (1 мкм), то здесь решающую роль играет скорость и направление вертикальной составляющей потока. Если вертикальная скорость потока направлена вниз, то даже мелкие частицы попадают в ловушку. Однако если вертикальная скорость потока направлена вверх, например, равна (-0,3 м/с), то, как показано на рисунке 1.12, картина для мелких частиц качественно меняется, так они устремляются вверх и могут преодолеть заградительную дамбу и далее вылететь за пределы пляжа. Что касается крупных частиц, то на траекторию их движения вертикальная скорость восходящего воздушного потока в аэродинамической ловушке влияния не оказывает.





1)  $d=10^{-3}$  м; 2)  $d=10^{-4}$  м; 3)  $d=10^{-5}$  м; 4)  $d=10^{-6}$  м;  $\rho_1=1,18$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2=3300$  кг/м<sup>3</sup>;  $C=1,1$ ;  $U_y=0,3$  м/с;  $V_0=0$ .

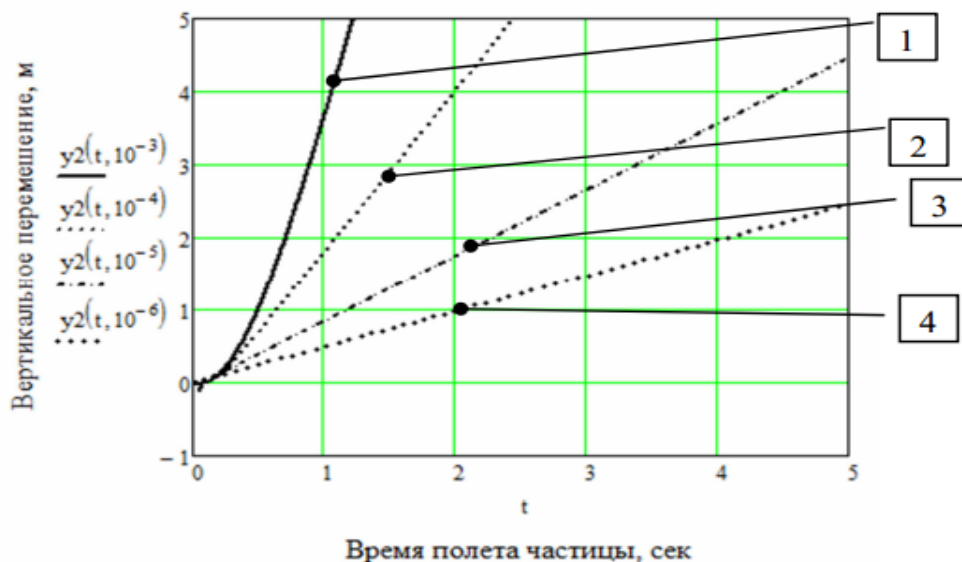
Рисунок 1.10 – Величина вертикального перемещения частиц в воздушном потоке при вертикальной скорости потока вниз [6]



1)  $d=10^{-3}$  м; 2)  $d=10^{-4}$  м; 3)  $d=10^{-5}$  м; 4)  $d=10^{-6}$  м;  $\rho_1=1,18$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2=3300$  кг/м<sup>3</sup>;  $C=1,1$ ;  $U_y=-0,3$  м/с;  $V_0=0$ .

Рисунок 1.11 – Величина вертикального перемещения частиц в воздушном потоке при вертикальной скорости потока вверх [6]

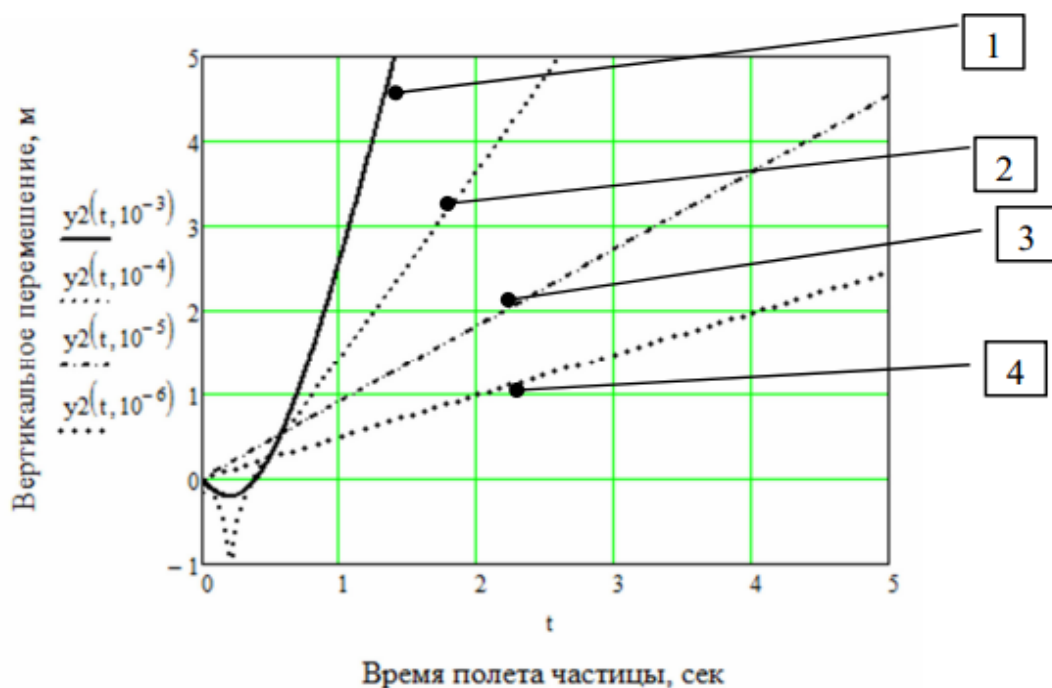
Возможна также такая ситуация, когда вектор скорости частицы на стартовом участке аэродинамической ловушки имеет вертикальную составляющую, направленную вверх, т.е.  $V_0 < 0$ . В этом случае, в принципе, пылевая частица имеет возможность по инерции преодолеть заградительную дамбу. На рисунке 1.12 представлены расчеты, когда стартовая скорость частиц на подлете к началу аэродинамической ловушки равна скорости восходящего потока на участке разгона, то есть на левой, относительно рисунка 1.4, стороне пляже. Эпюра вертикальных скоростей по обеим сторонам пляжа в различных сечениях представлена на рисунке 1.6. Далее рассматривается крайний случай, когда случай, когда на участке разгона частица набрала максимальную вертикальную скорость  $V_0 = -0.5$  м/с. Различия между рисунками (1.10) и (1.12) весьма незначительное. Следовательно, можно утверждать, что нисходящий участок пляжа на выходе из хвостохранилища действительно выполняет функцию аэродинамической ловушки, несмотря на то, что на восходящем участке частицы получают восходящую скорость вертикально вверх.



1)  $d=10^{-3}$  м; 2)  $d=10^{-4}$  м; 3)  $d=10^{-5}$  м; 4)  $d=10^{-6}$  м;  $\rho_1=1,18$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2=3300$  кг/м<sup>3</sup>;  $C=1,1$ ;  $U_y=-0,3$  м/с;  $V_0=-0.5$  м/с

**Рисунок 1.12 – Величина вертикального перемещения частиц в воздушном потоке при вертикальной скорости потока вверх [6]**

Рассматривается еще один крайний случай, когда начальная скорость восходящего потока предельно высокая и составляет  $V_0 = -2,0$  м/с. Как свидетельствуют расчеты, даже в этом случае аэродинамическая ловушка выполняет свое предназначение и улавливает частицы пыли перед ограждающей дамбой. В частности даже мелкие частицы микронного размера (позиция 4 на рисунке 1.13) перемещаются вниз, на глубину около 2 м через 5 сек горизонтального перемещения.



1)  $d=10^{-3}$  м; 2)  $d=10^{-4}$  м; 3)  $d=10^{-5}$  м; 4)  $d=10^{-6}$  м;  $\rho_1=1,18$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2=3300$  кг/м<sup>3</sup>;  $C=1,1$ ;  $U_y = -0,3$  м/с;  $V_0 = -2,0$  м/с

**Рисунок 1.13 – Величина вертикального перемещения частиц в воздушном потоке при вертикальной скорости потока вверх [6]**

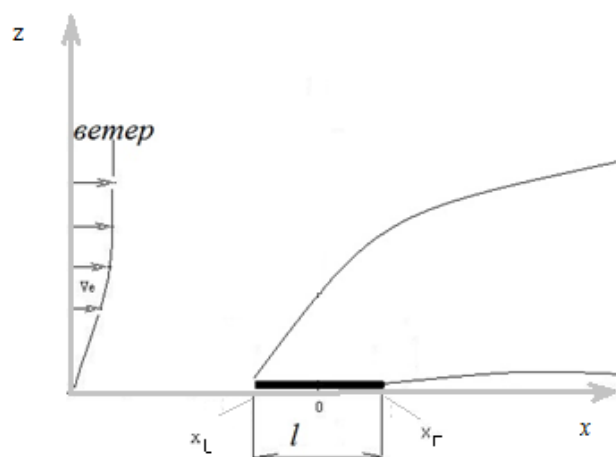
Таким образом, можно утверждать, что участок зоны осаждения длиной 50 м, на котором имеет место уклон сухого пляжа в сторону берега, по крайней мере, на 3-4 м способен выполнять функцию аэродинамической ловушки и поэтому рекомендуется к практическому использованию. В сочетании с закреплением сухой поверхности естественным или искусственным вяжущим материалом эффект пылеподавления очевидно усиливается.

## ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе представлена математическая модель для описания процессов массопереноса и прогнозирования распределения скорости, концентрации радиоактивных загрязняющих веществ, распространяющихся под действием ветра. Данная модель построена на основе анализа известных экспериментальных данных, используя понятия и методы механики реагирующих сред [16] и анализа существующих моделей загрязнения окружающей среды. Пыль, содержащая радиоактивные частицы, может подниматься под действием воздушных потоков и переноситься на значительные расстояния. Считается, что 1) течение носит развитый турбулентный характер, молекулярным переносом пренебрегают, 2) плотность газообразной фазы не зависит от давления из-за низкой скорости потока по сравнению с со скоростью звука, 3) оседание частиц подчиняется закону Стокса. Рассмотрим задачу для двух координат: горизонтальной и перпендикулярной к земной поверхности вертикальной составляющей. Кроме того, предположение о двумерной конфигурации может быть оправдано, учитывая, что длина загрязненных участков может быть достаточно большой. Для описания конвективного переноса, мы используем уравнения Рейнольдса для турбулентного течения. Участок, с которого поднимаются загрязняющие вещества, моделируется как плоский источник выделения радиоактивных примесей.

### 2.1 Постановка задачи

Рассмотрим процесс распространения радионуклидов в рассматриваемой области. (Рисунок 2.1). Пусть,  $l$  – ширина зоны, содержащей загрязняющие радиоактивные вещества. На левой границе рассматриваемой области задана скорость ветра на высоте  $h$ . Под действием ветра частицы пыли, содержащие радиоактивные вещества, поднимаются в воздух и переносятся в направлении оси  $x$ . Учитывается осаждение радиоактивных частиц.



**Рисунок 2.1 – Схема расчетной области**

Математическое решение задач сводится к решению данной системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_t \frac{\partial u}{\partial z}), \quad (2.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_t \frac{\partial w}{\partial z}), \quad (2.3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_0) \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\rho D_t \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D_t \frac{\partial c}{\partial z}), \quad (2.4)$$

$$w_0 = \frac{d_r^2 (\rho_0 - \rho) g}{18 \mu}, \quad (2.5)$$

Данная система уравнений решается с учетом начальных и граничных условий:

$$t=0 \quad u=0, \quad w=0, \quad c=0; \quad (2.6)$$

$$x=0 : \quad u=u_{\infty}, \quad w=0, \quad c=0; \quad (2.7)$$

$$x=x_{\infty} : \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0; \quad (2.8)$$

$$z=0 \quad u=0, w = \begin{cases} 0, & x < x_l \\ w_d, & x_l \leq x \leq x_r \end{cases} \quad (2.9)$$

$$c = c_0, x_l \leq x \leq x_r; \frac{\partial c}{\partial z} = 0, x < x_l, x > x_r; \quad (2.10)$$

$$z=z_{\infty} \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial c}{\partial z} = 0; \quad (2.11)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $x, z$  – координаты,  $u, w$  – проекции вектора скорости соответственно на оси  $x, z$ ,  $c$  – концентрации,  $p$  – давление,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $D_t$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $w_0$  – скорость осаждения частиц;  $w_d$  – скорость подъема частиц;  $\rho_0, d_r$  – плотность и диаметр частиц пыли.

## 2.2 Метод решения

Для численного интегрирования исходной системы уравнений используется метод контрольного объёма [17]. Вся расчетная область разбивается на непересекающиеся контрольные объёмы. Типичный контрольный объём представлен на Рисунок 2.2

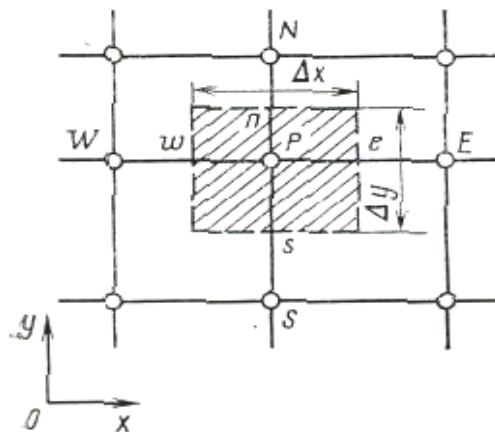


Рисунок 2.2 – Контрольный объём (заштрихованная область) для двухмерного случая

Каждое из дифференциальных уравнений системы (2.1)-(2.4) записывается в виде обобщенного дифференциального уравнения:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (2.12)$$

Здесь  $\Phi$  обобщенная функция, соответствующая искомым переменным ( $u, w, c$ ). Далее каждое дифференциальное уравнение интегрируется по всем контрольным объемам. В результате получаем системы алгебраических уравнений для всех искомых зависимых переменных в виде дискретного аналога, который можно записать в следующем виде:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b, \quad (2.13)$$

где

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [|-F_e, 0|]; \quad (2.14)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [|F_w, 0|]; \quad (2.15)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [|F_n, 0|]; \quad (2.16)$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + [|F_s, 0|]; \quad (2.17)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_P^0 \Phi_P^0, \quad (2.18)$$

Здесь  $\Phi_P^0$  и  $\rho_P^0$  обозначают известные значения для времени  $t$ , а все другие величины ( $\Phi_P, \Phi_E, \Phi_w, \Phi_N, \Phi_S$  и т. д.) представляют собой неизвестные величины для времени  $t + \Delta t$ . Массовые расходы  $F_e, F_w, F_n$  и  $F_s$  определены уравнениями (2.14-2.18). Соответствующие проводимости представим в виде

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e}; \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w}; \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta x)_n}; \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta x)_s}; \quad (2.19)$$

а числа Пекле

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}; \quad P_w = \frac{F_w}{D_w}; \quad P_n = \frac{F_n}{D_n}; \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}. \quad (2.20)$$

Функция  $A(|P|)$  должна соответствовать выбранной схеме.

Рекомендуется схема со степенным законом, для которой

$$A(|P|) = [|0, (1 - 0,1|P|)^5|]. \quad (2.21)$$

Следует отметить, что даже на этой стадии физический смысл различных коэффициентов в (2.13) понятен. Коэффициенты в соседних точках

$a_E$ ,  $a_W$ ,  $a_N$  и  $a_S$  учитывают влияние конвекции и диффузии для четырех граней контрольного объема, которые зависят от массового расхода  $F$  и проводимости  $D$ . Член  $a_P^0 \Phi_P^0$  характеризует известную величину  $\Phi$  для контрольного объема (для времени  $t$ ), отнесенную к шагу по времени. Оставшиеся члены можно интерпретировать аналогичным образом [17]. Полученная система алгебраических уравнений решалась на каждом временном слое при помощи метода SIP [18].

Также сформулировали процедуру для решения общего дифференциального уравнения для переменной  $\Phi$  при заданном поле скорости. На отдельных частных случаях задание поля скорости не представляется возможным. Также, для его определения необходимо рассчитать скорости и поле плотности по соответствующим уравнениям.

Описывающие уравнение составляющие скорости и количества движения, показывающимся частными случаями обобщенного дифференциального уравнения для  $\Phi$  (в этом уравнении  $\phi = u$ ,  $\Gamma = \mu$  и так далее.). Таким образом, мы склонны сделать вывод о том, что мы уже разработали метод решения уравнений импульса, тем самым получая поле скоростей [19].

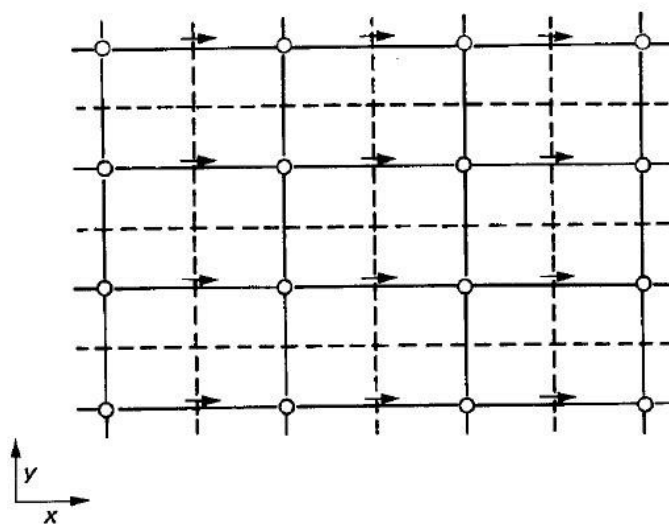
Если трудностью оказывается нелинейность уравнений количества движения, то следует учесть нелинейность с помощью итераций. Например, зависимость коэффициента в конвективном члене  $\rho u$  от зависимой переменной  $u$  уравнения количества движения аналогична с этой точки зрения зависимости коэффициента теплопроводности  $k$  от температуры  $T$ . Начав с некоторого начального поля скорости, мы могли бы решить уравнения итерационным методом и получить искомые составляющие скорости. Действительная трудность расчета поля скорости связана с неизвестным полем давления. Градиент давления образует часть исходного термина для уравнения количества движения, при этом нет явного уравнения для определения



давления. Когда поле правильное давление подставляется в уравнения количества, поле скоростей удовлетворяет уравнению непрерывности. Это косвенное указание, однако, не очень полезно для наших целей, если только не считать прямое решение всей системы уравнений, получаемой из дискретных аналогов уравнений количества движения и неразрывности. Так как мы предпочли итерационные методы решения дискретных аналогов даже для одной зависимой переменной, прямое решение для всего набора компонентов скорости и давления здесь не рассматриваются [19].

Трудности, описанные до сих пор, могут быть решены путем признания того, что мы не должны рассчитать все переменные для одних и тех же узловых точек. В случае компонентов скорости, существует значительное преимущество – они могут быть получены путем размещения их на сетках, которые отличаются от сетки, используемой для всех других переменных.

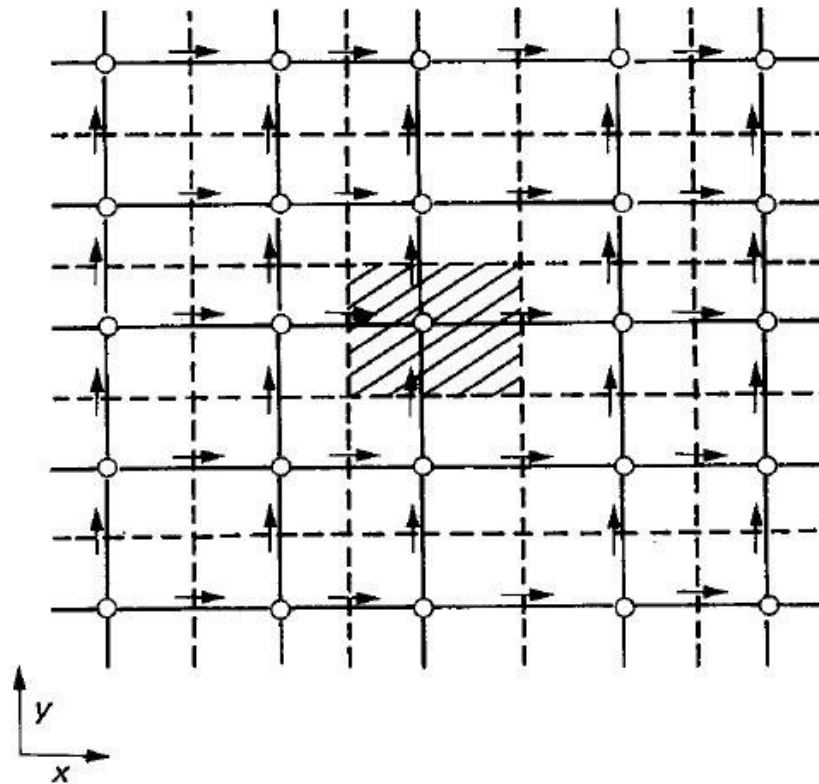
Также смещенные или располагающиеся «в шахматном порядке» сетки для компонент скорости были впервые использованы Харлоу и Welch (1965) [20]. В шахматной сетке, компоненты скорости вычисляются для точек, лежащих на контрольных объемах.



**Рисунок 2.3 – Расположение и в шахматном порядке**

Скорость  $u$  вычисляется по граням нормальным для оси  $x$ . Места для  $u$  показаны на рисунке 2.3 короткими стрелками, а точки сетки (далее именуемые

основной сеткой точек) показаны кружочками; пунктирные линии указывают на грани контрольного объема. Следует отметить, что по отношению к узловым точкам основной сетки точки смещены только в направлении оси  $x$ . Иными словами, расположение для  $u$  лежит на  $x$  – направлении, соединя две соседние основные точки сетки. Линии расположения  $u$ -это ровно посередине между точками сетки и зависят от того, какие объемы контроля определяются. Узловая точка для  $u$  должна лежать на грани контрольного объема независимо от того, находится ли последняя посередине между узловыми точками или нет. Это легко увидеть, так как в местах для компонент скорости  $u$  и  $w$  должны быть определены. На рисунке 2.4 представлена двумерная сетка.



**Рисунок 2.4 – Расположение  $u$  и  $w$  в шахматном порядке: обозначения те же, что и на рисунке 2.3, вертикальные стрелки — места определения  $w$**

Непосредственным следствием шахматного порядка сетки является то, что величина расхода массы через грани контрольного объема могут быть вычислены без какой-либо интерполяции для соответствующих компонент скорости. Однако, эта функция, хотя и дает некоторые удобства в настройке

общего уравнения дискретизации для  $\phi$ , но не является важным преимуществом сетки в шахматном порядке. Видно, что для типичного контрольного объема (заштрихованный участок на рисунке 2.4) дискретный аналог уравнения неразрывности содержит разности составляющих скорости в соседних точках, а это приводит к тому, что волнистое поле скорости не будет удовлетворять уравнению неразрывности. В шахматном порядке сетки будут только поля скоростей имеют возможность быть приемлемым для уравнения неразрывности. Второе важное преимущество в шахматном порядке сетки является то, что разность давлений между двумя соседними точками сетки теперь становится естественной движущей силой для компонента скорости, лежащей между этими точками сетки.

Следовательно, поля давления больше не будут ощущаться как неоднородные поля давления и не могут возникать в качестве возможных решений [19].

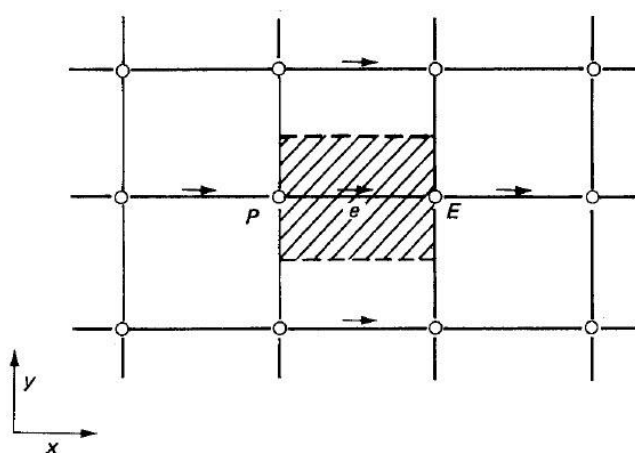


Рисунок 2.5 – Контрольный объем для  $u$

В этом контрольном объеме нет ничего необычного. Его грани лежат между точкой  $e$  и соответствующими соседними точками. Однако он смещен по отношению к обычному контрольному объему, расположенном у вокруг узловой точки  $P$ . Смещение объема произошло только в направлении оси  $x$  таким образом, что перпендикулярные этому направлению грани проходят через основные узловые точки  $P$  и  $E$ .

Отсюда видно одно из главных достоинств шахматной сетки: разность  $p_P - p_E$  можно использовать для расчета силы давления, действующей на контрольный объем для скорости  $u$  [19].

Для расчета коэффициента диффузии массового расхода на гранях контрольного объема, показанного на рисунок 2.5, потребуется соответствующая интерполяция. Результирующий дискретный аналог можно записать в виде

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e . \quad (2.22)$$

Член  $(p_P - p_N) A_n$  представляет собой силу давления. Уравнения количества движения можно решить только в том случае, если поле давления задано или каким-то образом найдено. Если при решении использовать неверное поле давления, найденное поле скорости не будет удовлетворять уравнению неразрывности. Выразим такое поле скорости, полученное с использованием приближенного поля давления  $p^*$ , через  $u^*$ ,  $v^*$ . Это поле скорости находится в результате решения следующих уравнений:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e , \quad (2.23)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n , \quad (2.24)$$

в этих уравнениях компоненты скорости и давление с верхними индексами. Затем обсудим способ расчета давления  $p^*$ . Таким образом, полученное шахматное поле скоростей постепенно будет удовлетворять уравнению неразрывности. Предлагается, что правильное давление получается из  $p^*$

$$p = p^* + p' . \quad (2.25)$$

где  $p'$  назовем поправкой давления. Надо выяснить, как будут изменяться составляющие скорости в соответствии с таким изменением давления.

Аналогичным образом введем соответствующие поправки составляющих скорости:

$$u = u^* + u' ; v = v^* + v' , \quad (2.26)$$

вычитая (2.23) из (2.22) получаем

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + (p'_P - p'_E) A_e . \quad (2.27)$$

результат

$$a_e u'_e = (p'_P - p'_E) A_e . \quad (2.28)$$

или

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) , \quad (2.29)$$

где

$$d_e \equiv \frac{A_e}{a_e} . \quad (2.30)$$

Уравнение (2.29) назовем поправочной формулой для скорости. Его можно переписать в виде

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P + p'_E) . \quad (2.31)$$

Отсюда видно, какой должна быть поправка к значению скорости  $u$ , определяемая поправками давления, чтобы получилось значение  $U_e$  [19].

Аналогичным образом запишем поправочные формулы для других составляющих скорости:

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_N) , \quad (2.32)$$

итак, проводится предварительный анализ перед выводом уравнения для сеточных значений  $p'$ , сам вывод уравнений приведен ниже.

Преобразуем уравнение неразрывности в уравнение для поправки давления. Предположим, что плотность  $\rho$  непосредственно не зависит от давления. Смысл этого предположения будет рассмотрен ниже.

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (2.33)$$

Мы будем интегрировать уравнение по выделенному объему, показанному на рисунке 2.6 [19].

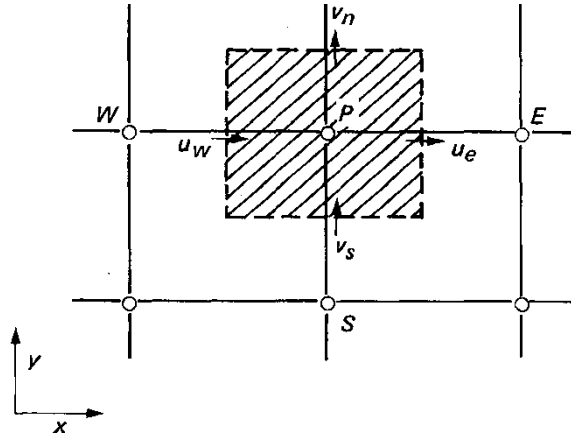


Рисунок 2.6 – Контрольный объем для уравнения неразрывности. Обозначения те же, что и на рисунке 2.5

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_s] \Delta y \\ & + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Если теперь вместо всех составляющих скорости подставить их выражения из поправочных формул для скорости [таких, как (2.31)-(2.33)], то после группировки соответствующих членов получим следующее уравнение для сеточных значений  $p'$ :

$$a_{PP'} p' = a_{EP'} p'_E + a_{WP'} p'_W + a_{NP'} p'_N + a_{SP'} p'_S, \quad (2.35)$$

где

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad (2.36a)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad (2.36b)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x, \quad (2.36c)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, \quad (2.36d)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x. \quad (2.36e)$$

Процедура, разработанная для расчета поля течения, получила название SIMPLE, что означает полунявный метод для связывающих давление уравнений. Обсудим смысл этого названия несколько позднее. Данная процедура описывалась в Патанкар и Spalding (1972) [21].

Последовательность операций. Ниже перечислены основные операции в порядке их выполнения [19].

1. Задание поля давления  $p^*$ .
2. Решение уравнений движения, таких, как уравнения (2.23)-(2.24), для получения  $u^*$ ,  $v^*$ .
3. Решение уравнения для  $p'$ .
4. Расчет  $p$  из уравнения (2.25) путем добавления  $p'$  к  $p^*$ .
5. Расчет  $u$ ,  $v$  с учетом соответствующих значений со звездочкой и с помощью формул для поправки скорости (2.28)-(2.29).
6. Решение дискретных аналогов для других  $\phi$  (таких, как температура, концентрация и турбулентные характеристики), если они влияют на поле течения через физические свойства жидкости или источниковые члены и т.д. (если какое-то определенное  $\phi$  не влияет на поле течения, лучше рассчитать его после получения сходимости решения для поля течения).
7. Представление скорректированного давления  $p$  как нового  $p^*$  и повторение всей процедуры до тех пор, пока не будет получено сходящееся решение [19].

При численных расчетах вместо уравнения (2.25) применяется

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (2.37)$$

$\alpha_p$  устанавливается равным приблизительно 0.8. Таким образом, расчеты приводят к сходимости, удовлетворяющей полю скорости [19].

Тестовые проверки программы расчета осуществлялись путем сравнения с аналитическими решениями, а также с известными численными решениями задач. Кроме того, для оценки точности используемых разностных схем и проверки правильности работы программы в целом использовался метод априори задаваемых аналитических решений, состоящий в том, что в используемые уравнения подставлялись аналитические выражения искомых функций, вычислялась невязка уравнений, которая затем трактовалась как фиктивный источник в каждом уравнении.



## ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

### 3.1 Результаты численных расчетов распределения концентрации радиоактивного загрязнения

Проведенные численные расчеты на основе изложенной математической модели по определению уровня радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ. В результате численного решения получены распределение полей скорости и концентраций загрязняющих веществ в различные моменты времени для различных скоростей ветра. На рисунках 3.1-3.3 представлены распределение концентраций загрязняющих веществ для скорости ветра 3 м/с в различные моменты времени  $t=3,5,7$  мин.

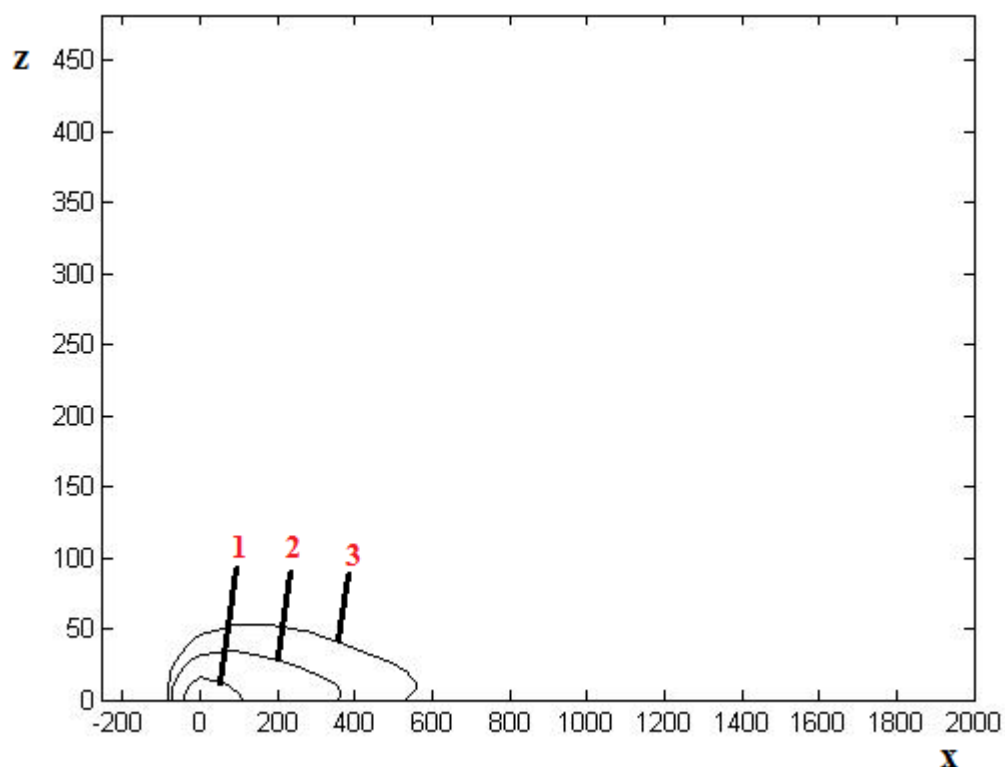
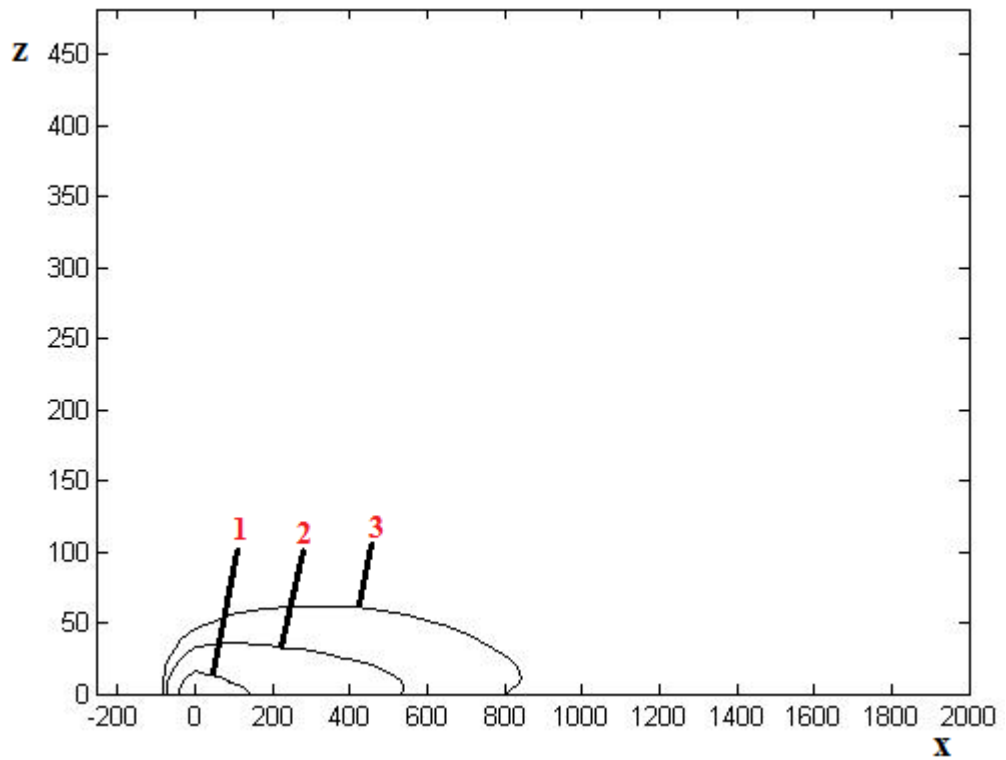
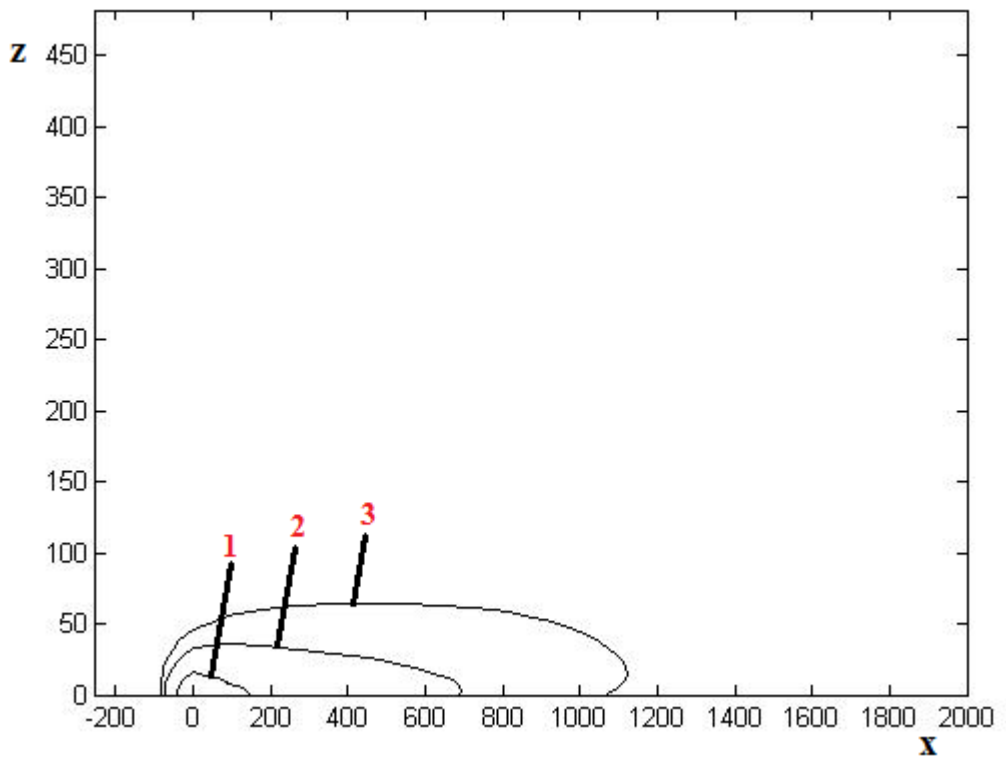


Рисунок 3.1 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001



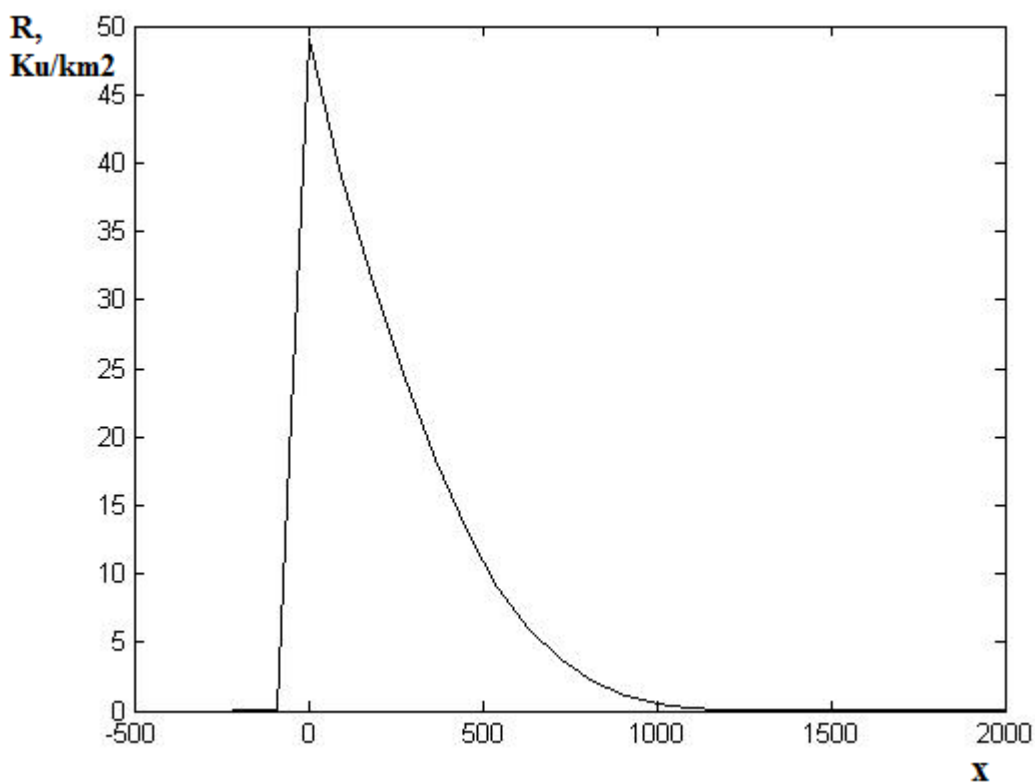
**Рисунок 3.2 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**



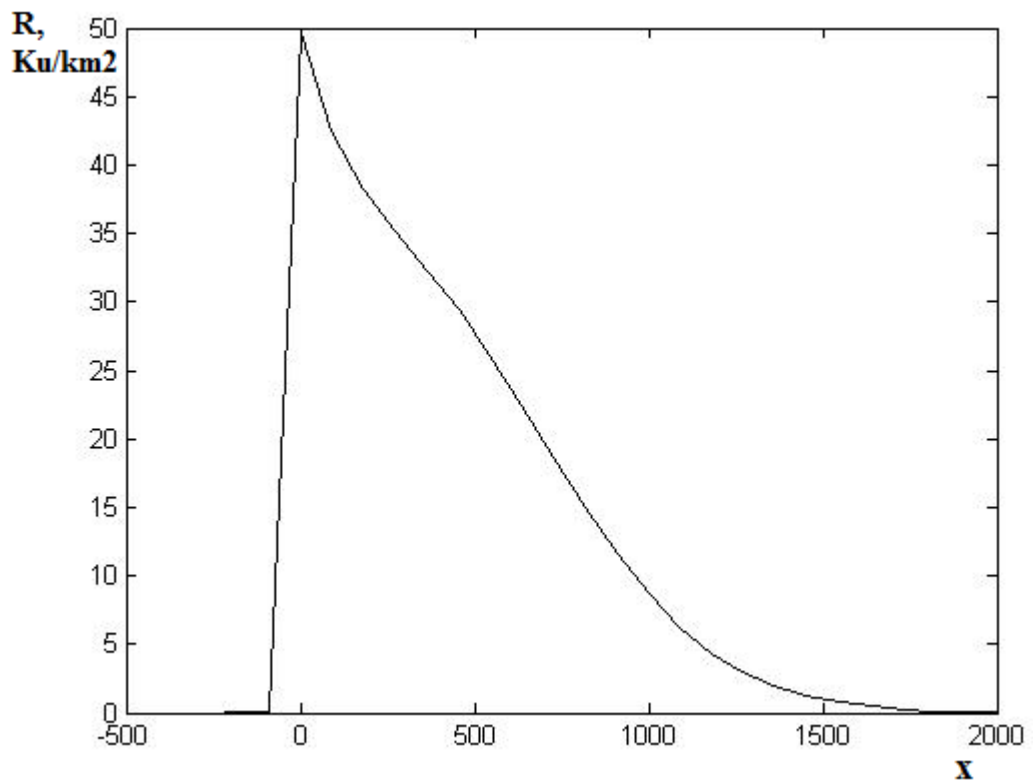
**Рисунок 3.3 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

На основе результатов, представленных на рисунках 3.1-3.3, можно сделать вывод, что при скорости ветра 3 м/с происходит дальнейшее распространение загрязняющих веществ в рассматриваемой области. В результате радиоактивная пыль распространяется на значительное расстояние от источника загрязнения.

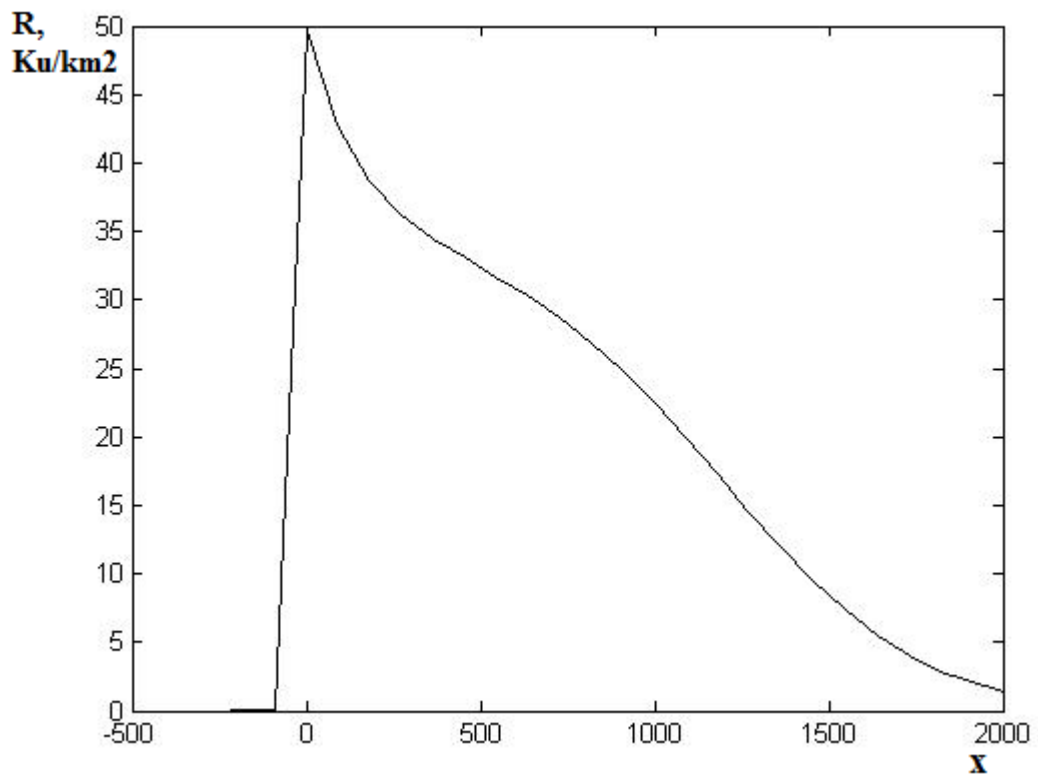
На рисунках 3.4-3.6 представлено распределение уровней радиоактивного загрязнения, соответствующее распределениям концентраций загрязняющих веществ, представленных на рисунках 3.1-3.3  $R$  ( $R = \gamma \int_0^h cdz$ ,  $\gamma$  уровень радиоактивного загрязнения единицы массы пыли,  $Ku/kg$ ). На основании полученных данных в результатах можно сделать вывод, что уровень загрязняющих веществ увеличивается с течением времени.



**Рисунок 3.4 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 3 м/с в момент времени  $t=3$  мин**

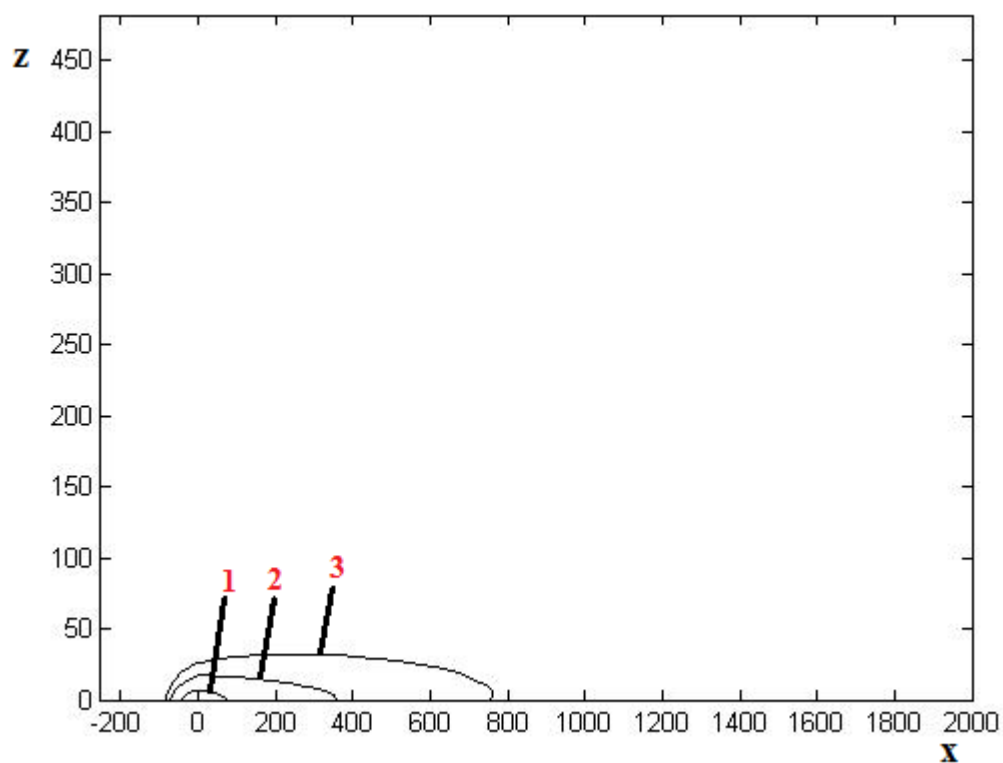


**Рисунок 3.5 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 3 м/с в момент времени  $t=5$  мин.**

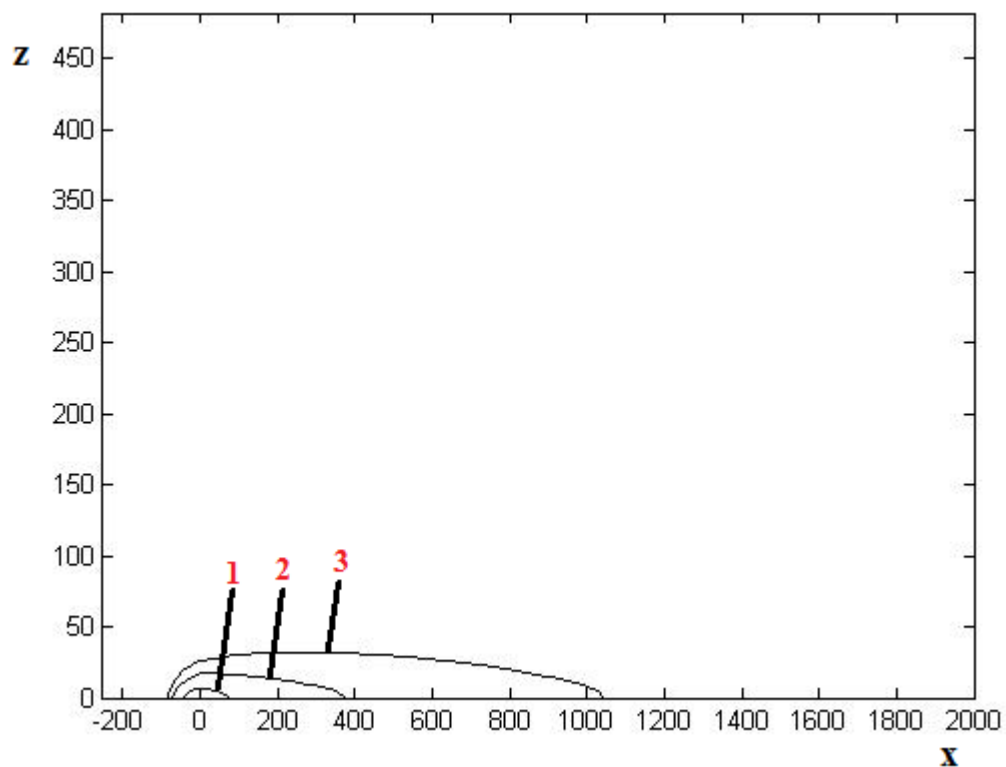


**Рисунок 3.6 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 3 м/с в момент времени  $t=7$  мин.**

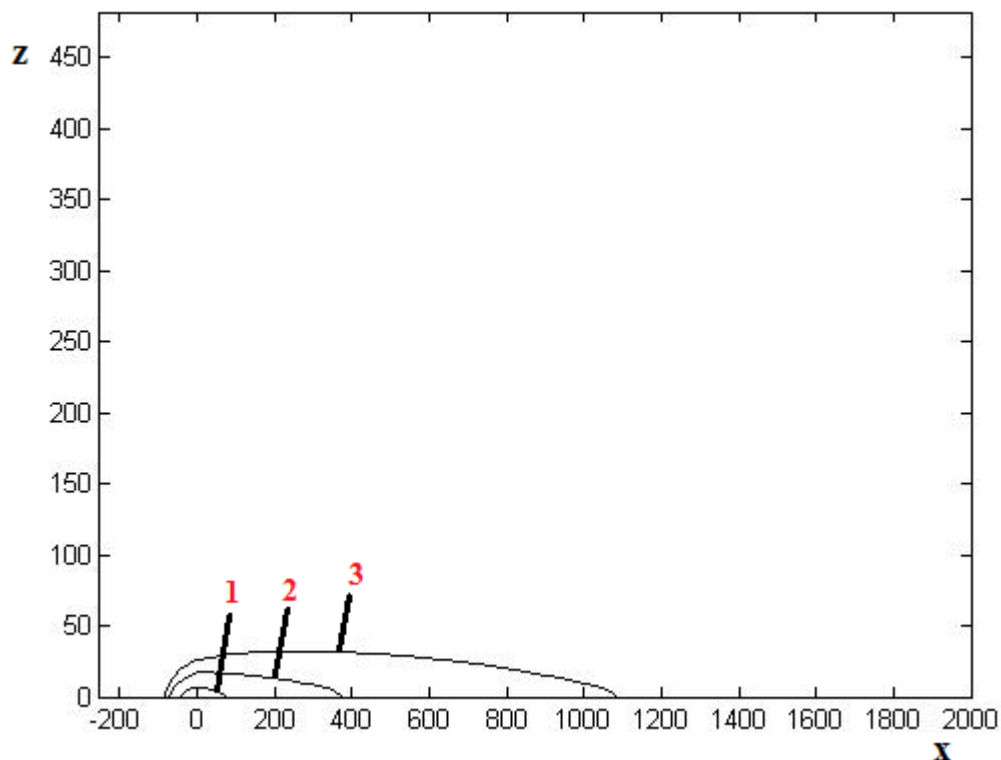
Также исследовалось влияние скорости ветра на перенос загрязняющих веществ и распределения уровней радиоактивного загрязнения. На рисунках 3.7-3.9 представлены распределение концентраций и уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 7 м/с в различные моменты времени  $t=3,5,7$  мин.



**Рисунок 3.7 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

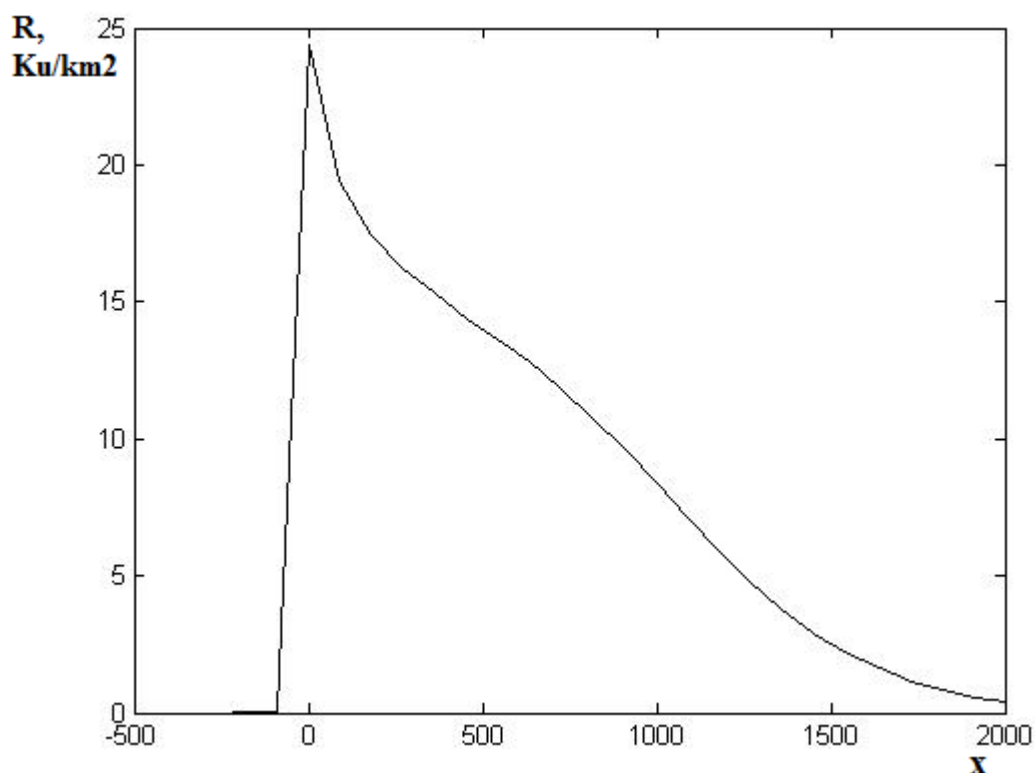


**Рисунок 3.8 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

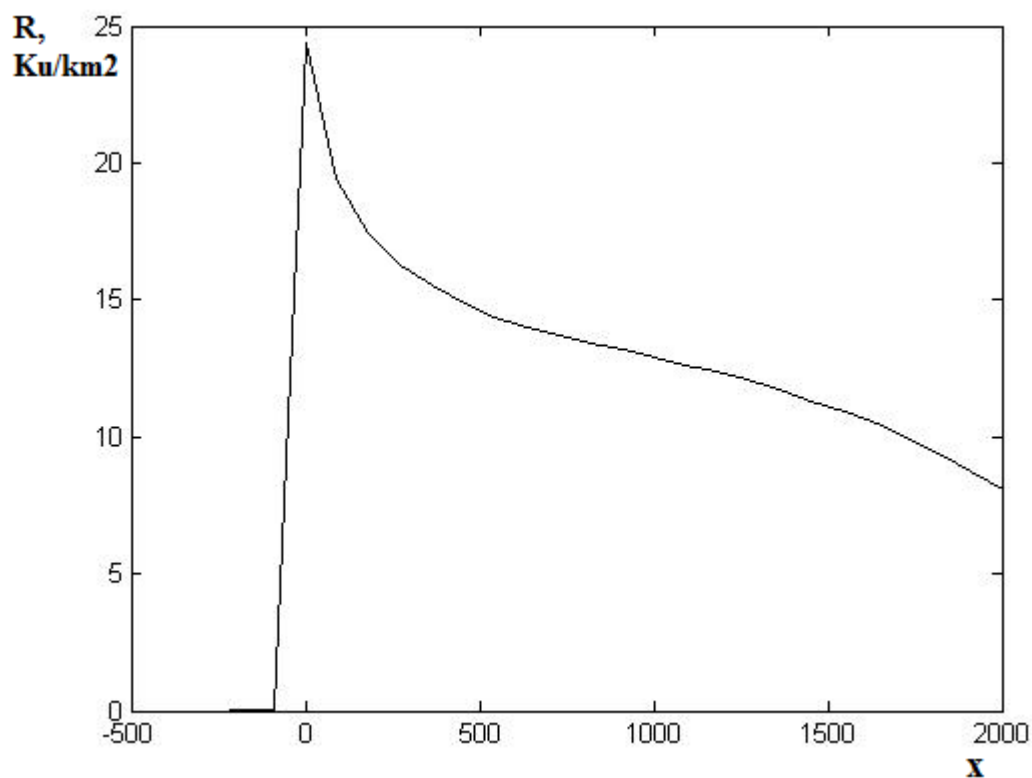


**Рисунок 3.9 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

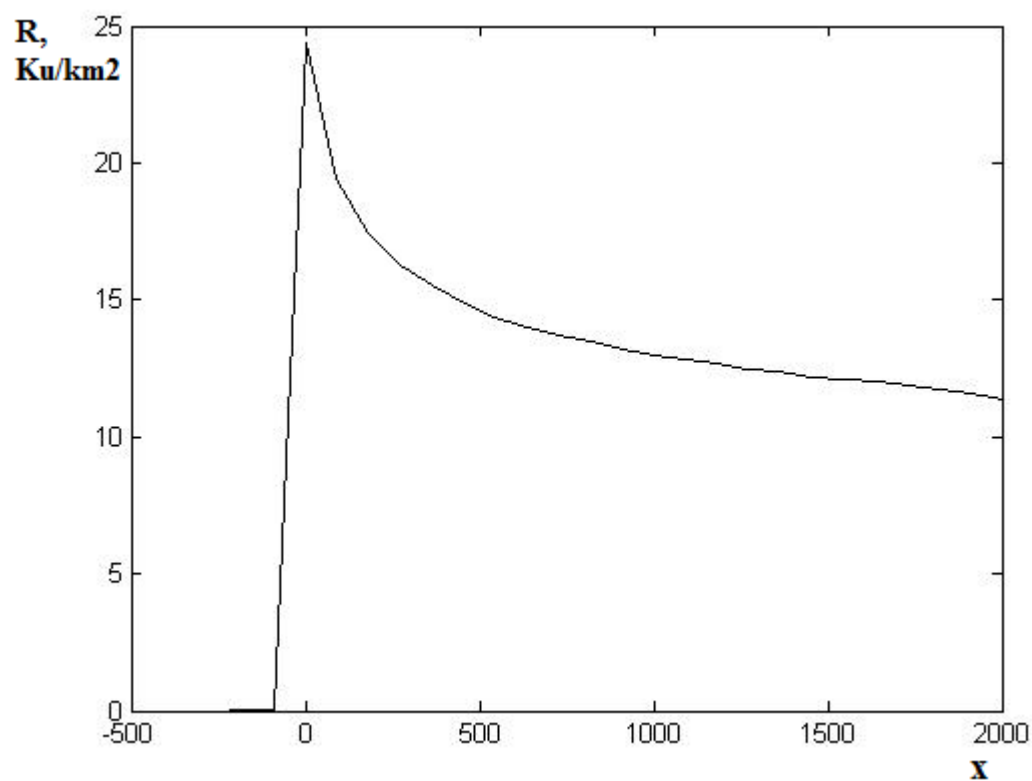
По рисункам 3.7-3.9 можно сделать вывод, что при скорости ветра 7 м/с, в различные моменты времени увеличивается и изменяется наклон изолинии. На основе полученных данных следует, что распределение концентрации и уровень радиоактивного загрязнения в течение времени (3,5,7 мин) возрастают. В результате радиоактивная пыль распространяется на значительное расстояние.



**Рисунок 3.10 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 7 м/с в момент времени  $t=3$  мин.**



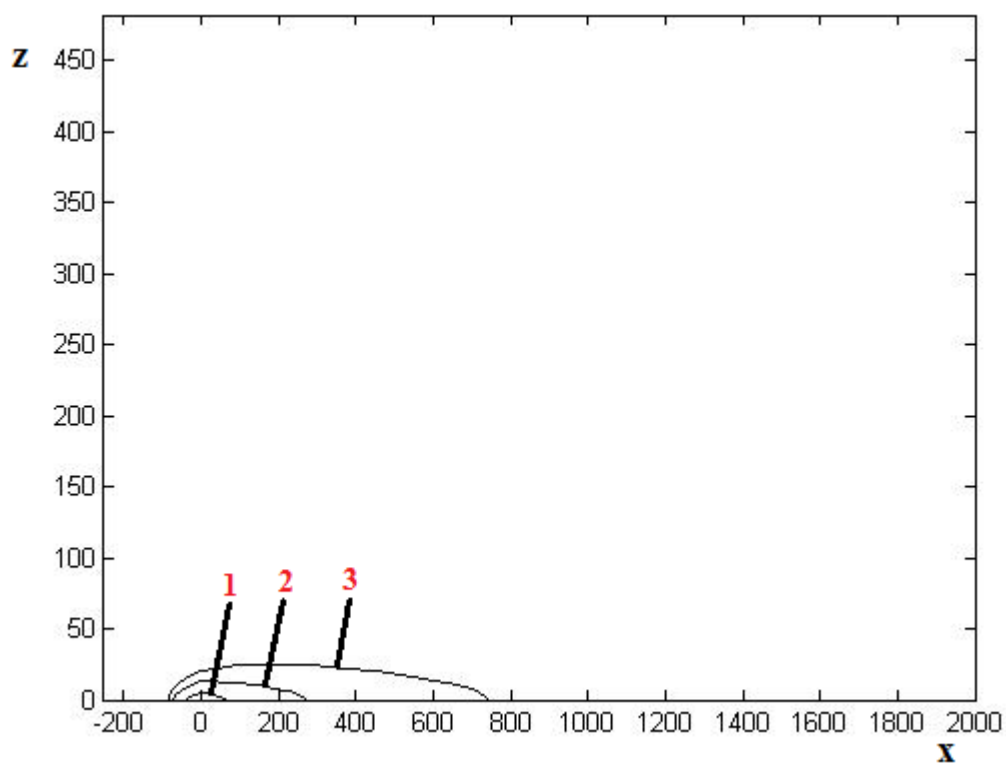
**Рисунок 3.11 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 7 м/с в момент времени  $t=5$  мин.**



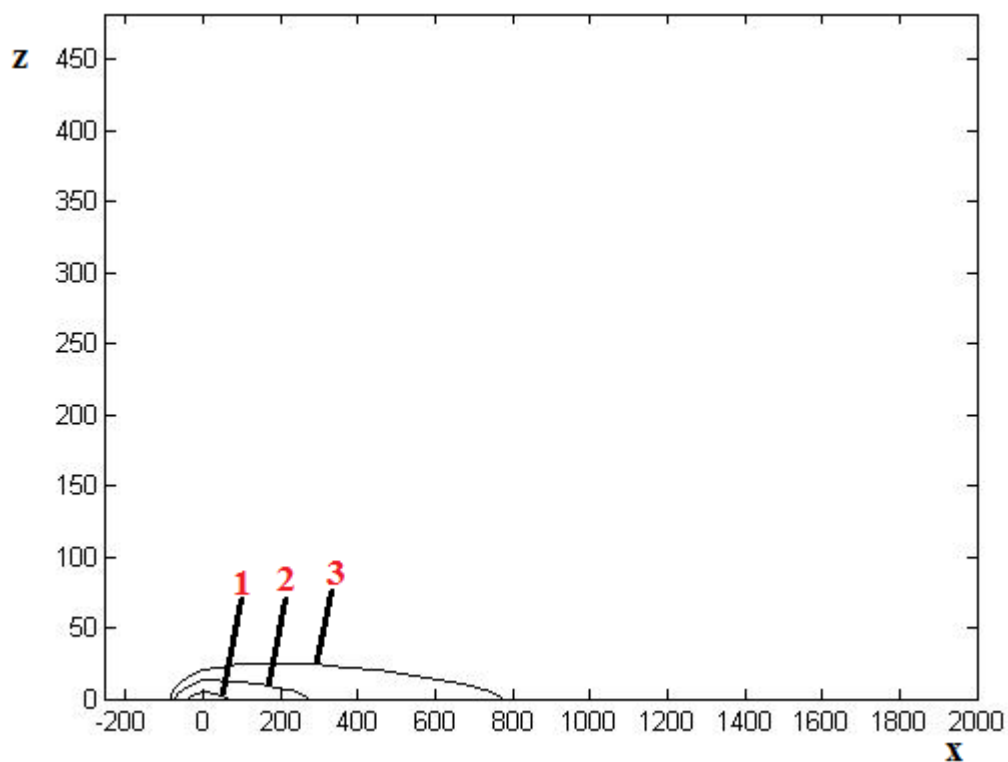
**Рисунок 3.12 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 7 м/с в момент времени  $t=7$  мин.**



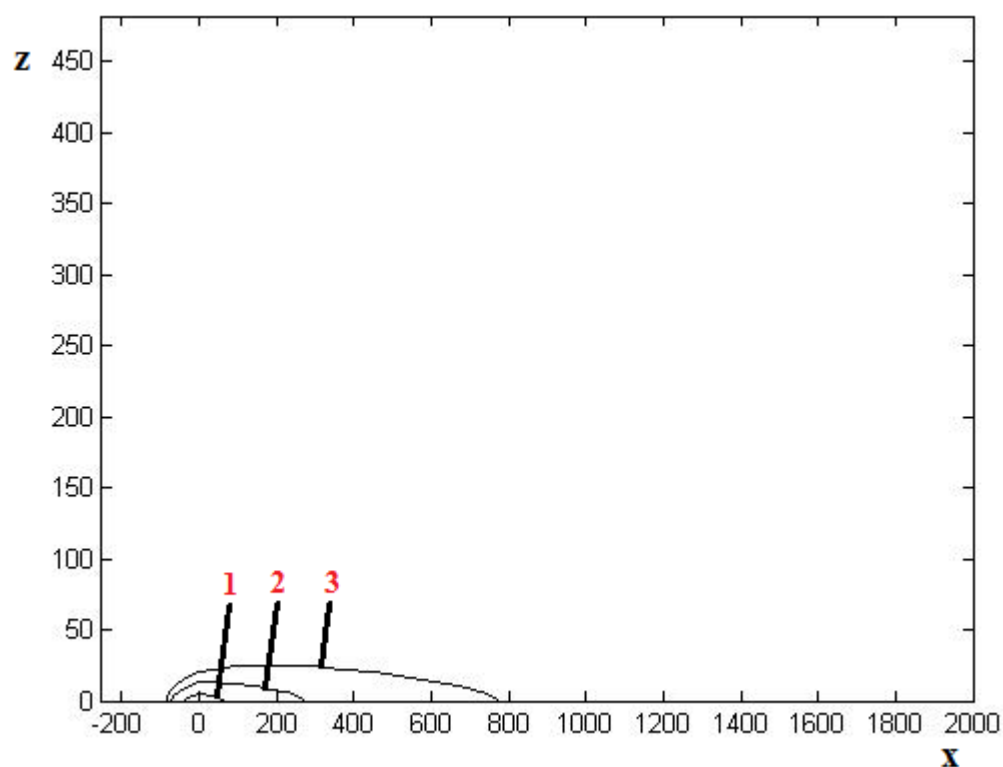
Также исследовалось влияние скорости ветра на перенос загрязняющих веществ и распределения уровней радиоактивного загрязнения. На рисунках 3.13-3.15 представлены распределения концентраций и уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 10 м/с в различные моменты времени  $t=3,5,7$  мин.



**Рисунок 3.13 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

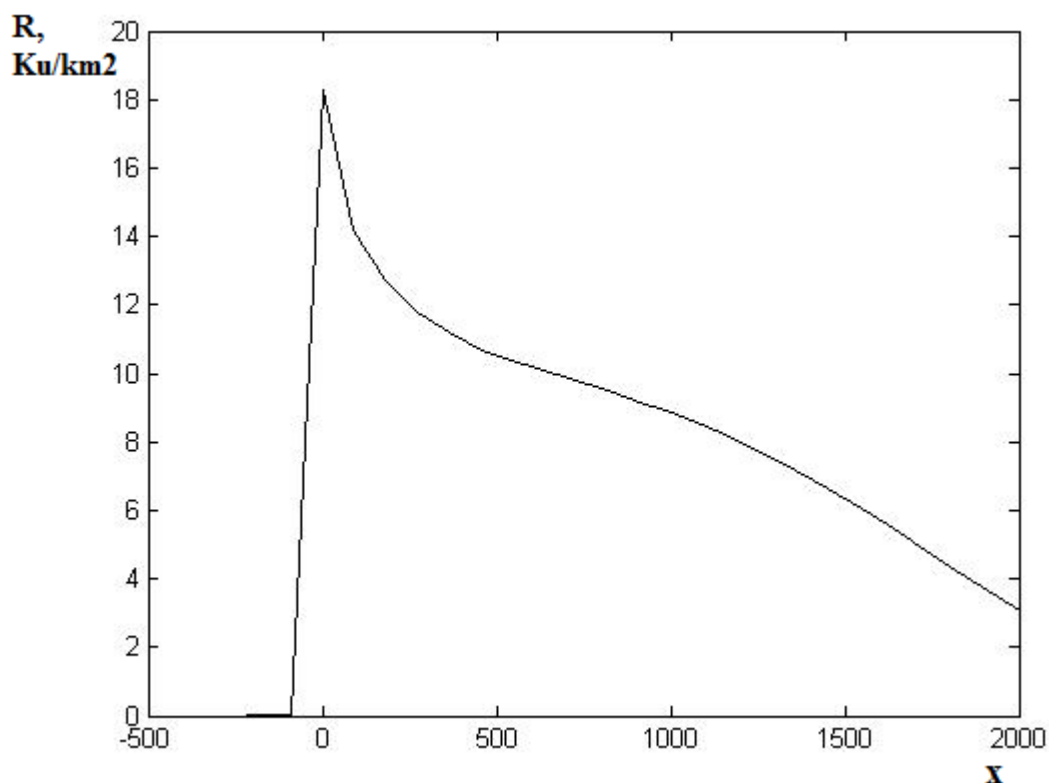


**Рисунок 3.14 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

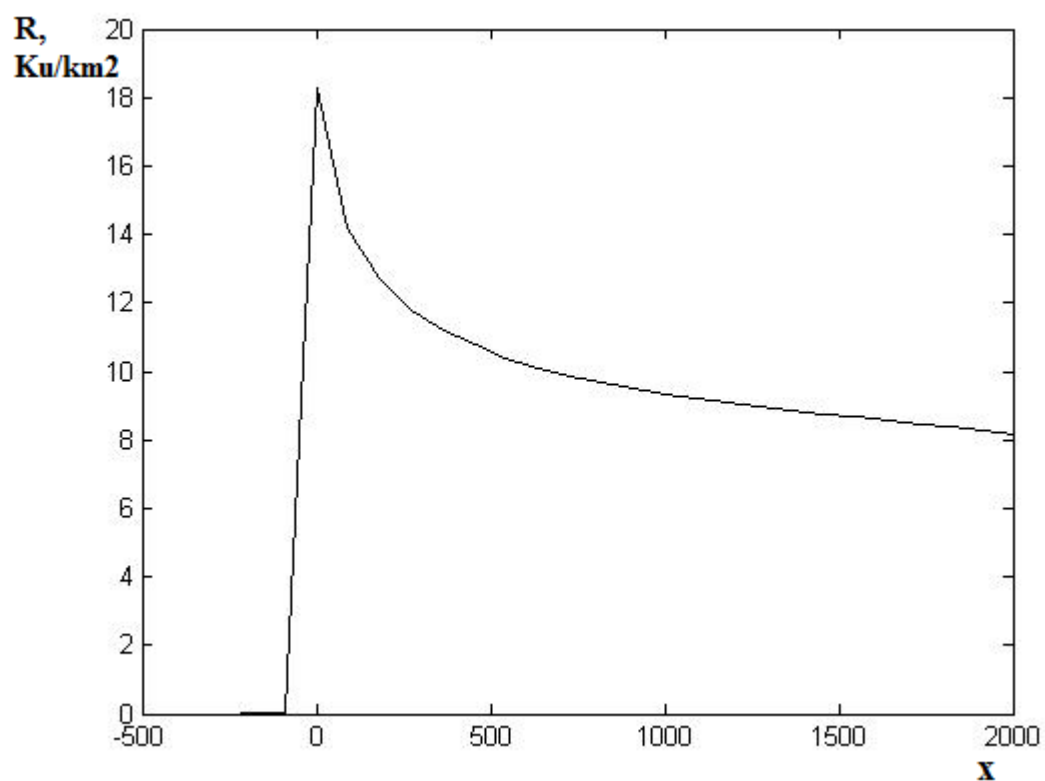


**Рисунок 3.15 – Распределение концентраций загрязняющих веществ для различных моментов времени: 1 - 0,001, 2 – 0,0001, 3 - 0,000001**

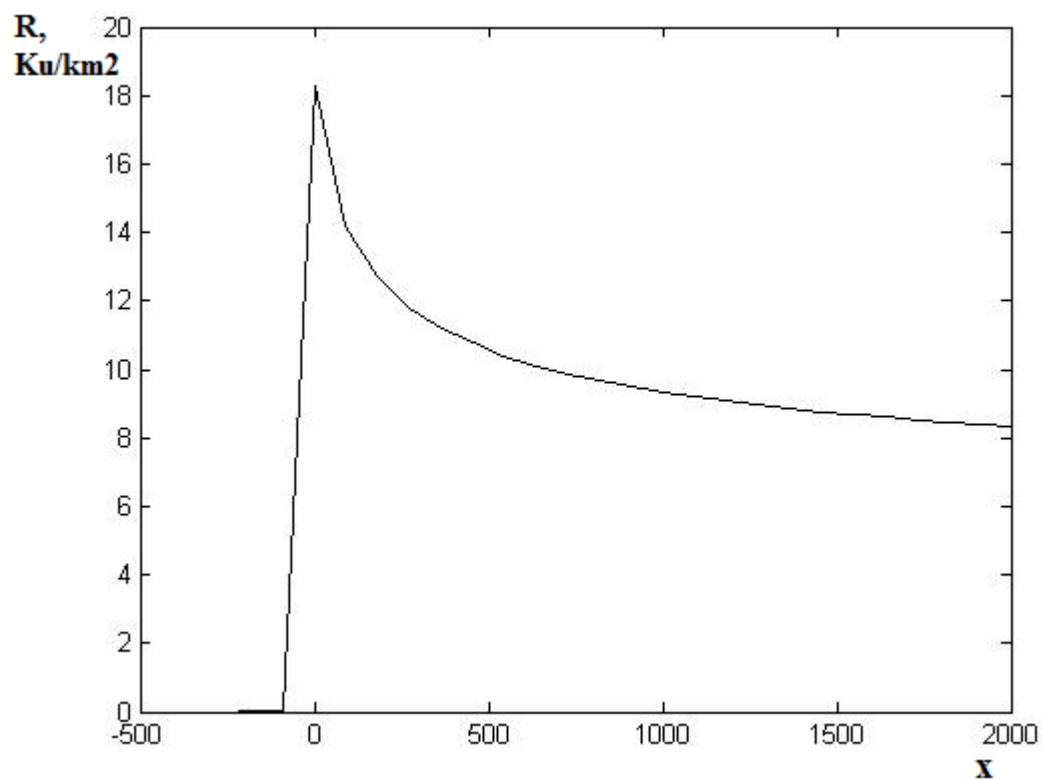
Из рисунков 3.13-3.15 можно сделать вывод, что при скорости ветра 10 м/с, изолинии прижимаются к земной поверхности. Тем не менее, уровень радиоактивного загрязнения распространяется на большее расстояния, чем в предыдущих случаях (скорости ветра 3 и 7 м/с). Результаты расчетов уровней радиоактивного загрязнения в различные моменты времени (3, 5 и 7 мин.) представлены на рисунках 3.16-3.18.



**Рисунок 3.16 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 10 м/с в момент времени  $t=3$  мин.**



**Рисунок 3.17 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 10 м/с в момент времени  $t=5$  мин.**



**Рисунок 3.18 – Распределение уровней радиоактивного загрязнения при скорости ветра 10 м/с в момент времени  $t=7$  мин.**

По рисункам можно сделать вывод, при скоростях ветра 3,7,10 м/с в различные моменты времени размеры распределения уровней радиоактивного загрязнения зависят от метеорологических условий (например, скорости ветра).

На основании полученных данных в результатах можно сделать вывод, что с увеличением скорости ветра загрязняющие вещества переносятся на большие расстояния, что приводит к увеличению области распространения уровней дополнительного радиоактивного загрязнения.

Таким образом, применение данной математической модели позволяет оценить скорость распространения загрязняющих веществ от хвостохранилищ в зависимости от метеорологических условий.

## ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

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

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Магистерская работа по теме «Математическое моделирование радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ с учетом переноса (пыли) под действием ветром в окружающей среде». Суть работы заключается в разработке методики оценки условий, распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ с учетом метеорологических условий.

Сегментировать рынок услуг по работе с компьютерной программой можно по следующим критериям [22]: зоны радиоактивности, где размещается организация и визуальное представление результатов математического моделирования (таблица. 4.1).

Таблица 4.1 – Сегментирование рынка

		Поверхности хвостохранилища	Площадь поверхности местности
Визуальное представление результатов математического моделирования	Формулы	1,2	1
	Графическое отображение	1,2	1
	Таблицы чисел	1,2	1

1. Математическая программа рассчитывающая переноса радиоактивного загрязнения;

2. RADION.

Результат сегментирования показал, что уровень конкуренции низок. Математическая программа рассчитывающая переноса радиоактивного загрязнения, как видно из сегментирования, единственная программа, которая может моделировать распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		$B_{\phi}$	$B_{\kappa 1}$	$K_{\phi}$	$K_{\kappa 1}$
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1.Удобство в эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,3
2.Автоматический расчет уравнений программой	0,2	5	3	1	0,5
3.Качество интеллектуального интерфейса	0,1	4	5	0,5	0,3
4. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
5.Визуальное представление результатов	0,2	5	3	1	0,5
Экономические критерии оценки эффективности					
1 цена	0,05	5	5	0,35	0,35
2 Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,5
3 Конкурентоспособность работы	0,15	4	4	0,65	0,75
Итого	1	38	34	5	3,6

где сокращения: Бф- Математическая программа рассчитывающая переноса радиоактивного загрязнения; Бк1 – RADION.

Анализ конкурентных технических решений определили по формуле [22]:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (4.1.1)$$

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

По итогам анализа данного является, что метод предложенный в дипломе эффективнее, чем методы конкурентов. Конкурентное преимущество в том, что: в математической программе рассчитывающей переноса радиоактивного загрязнения моделирует 2D модель и результат представляется в картинках; программа все нужные уравнения считает автоматически; простота использования.

#### 4.1.3 SWOT - анализ

SWOT - анализ –это анализ научного исследовательского проекта.

SWOT – анализ применяется для исследования внутренней и внешней среды проекта [27,28].

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Наличие опытного руководителя С2. . Наличие бюджетного финансирования С3. Наличие современного программного продукта С4. Актуальность проекта	Сл1. Развитие новых технологий Сл2. Ограниченная область применения Сл3. Отсутствие квалифицированного персонала. Сл4. Ограниченные финансовые возможности
В1.Снижения уровня загрязнения радионуклидов В2.Возможность создания партнерских отношений с рядом ведущих вузов.	– Возможно, создать партнерские отношения с рядом ведущих вузов для улучшения эффективного метода л; – При наличии	– В дальнейшем использование на математическую программу рассчитывающую переноса радиоактивного загрязнения;



В3.Повышение стоимости конкурентных разработок В4.Создания эффективного метода ликвидации радиоактивного загрязнения. У1.Появление новых технологий У2.Отсутствие спроса на новые технологии производства. У3. Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы. У4. Неумение персонала пользоваться продуктом	вышеперечисленных достоинств мы имеем большой потенциал повышения уровня локализация радиоактивного загрязнения. – За счет появления новых технологий цена на программу уменьшится; – Повышение квалификации персонала т.к. тема актуальна и есть современное оборудование.	– применения и развития новых технологий расширение области. – Эффективности метода испытание в работе и доказательство, чем у конкурентов;
--	---	---

Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 4, 5, 6, 7.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности Проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	-	+	-
	B2	+	+	+	+
	B3	-	+	+	+
	B4	+	+	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможности: B1C1C3C4, B2C1C2C3C4, B3C2C3C4, B4C1C2C3C4.

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Возможности Проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	+	-	+	-
	B2	-	-	+	+
	B3	+	-	-	-
	B4	+	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: В1С1С3, В2Сл3Сл4, В3В4Сл1.

Таблица 4.6 - Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Угрозы Проекта		С1	С2	С3	С4
	У1	-	-	+	-
	У2	-	-	0	-
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и угроз: У1С3.

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	0	-	+
	У2	+	+	-	-
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1Сл4, У2С1С2, У4С3.

#### **4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

В рамках данного раздела проведены альтернативные научные исследования в разделе 2 «Постановка задачи» ВКР.

Таблица 4.8 – Морфологическая матрица

	1	2	3	4
А. Визуализация результатов	график	формулы	2D модель	отсутствует
Б. Описание процесса	формулы	таблицы	блок схема	Отсутствуют
В. Описание поражающих факторов, количество	1	2	3	>3
Г. Длительность расчета программой, мин	5	20	40	60
Д. Интерфейс	русский	английский	французский	англо-русский
Е. Модели математического моделирования	интегральная	зонная	полевая	

Возможные варианты решения технической задачи:

1)A1B1B3Г1Д4Е1 – В первом случае, программа производит расчет только при малых скоростях ветра. В данной программе используется интегральный модель математического моделирования и расчет занимает мало времени. Представление результатов происходит с помощью графика.

2)A1B1B4Г2Д1Е2 – Во втором случае, программа производит расчет также при малых скоростях ветра. В данной программе используется зонная модель математического моделирования и расчет занимает чуть больше времени, чем в первом случае. Представление результатов происходит с помощью графика.

3)A3B1B4Г3Д2Е3 - В третьем случае, программа производит расчет при больших скоростях ветра. В данной программе используется полевая модель

математического моделирования и расчет занимает достаточно много времени.

Представление результатов – 2D модель

### 4.3. Планирование научно-исследовательских работ

#### 4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 4.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Магистрант
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, магистрант
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Магистрант
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Изучение компьютерной программы	
Практические исследования	9	Моделирование распространение радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ	Магистрант
	10	Моделирование переноса (пыли) радиоактивного загрязнения	
	11	Изучение результатов	
	12	Проведение расчетов по теме	
Оценка полученных результатов	13	Анализ результатов	магистрант
	14	Вывод по цели	Научный руководитель, магистрант

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного

исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула [23,24]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.3.1)$$

где:  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.3.2)$$

где:  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

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

### 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

*Диаграмма Ганта* – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{\text{кал}}, \quad (4.3.3)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.3.4)$$

где:  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$











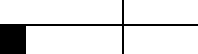


Все рассчитанные значения вносим в таблицу (таблица 4.10).



После заполнения таблицы 10 строим календарный план-график (табл. 4.11). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 4.10 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$			Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$		
	$t_{min}$ , чел-дни			$t_{max}$ , чел-дни			$t_{ожi}$ , чел-дни				Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3							
Составление и утверждение темы проекта	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Анализ актуальности темы	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Рук.-магистрант	1	1	1	3	3	3
Поиск и изучение материала по теме	1	1	1	5	5	5	2,6	2,6	2,6	Магистрант-рук.	1	1	1	2	2	2
Выбор направления исследований	1	1	2	2	3	3	1,4	2,8	2,8	Руководитель	1	2	2	2	3	3
Календарное планирование работ	1	1	1	2	2	2	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Изучение литературы по теме	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	Магистрант	9,8	9,8	9,8	14	14	14
Подбор нормативных документов	4	4	5	7	7	8	5,2	6,2	6,2	Магистрант-рук.	3	4	4	5	6	6
Изучение ПО	2	2	6	6	9	9	3,8	5,2	5,2	Магистрант	2	2	4	6	6	9
Моделирование распространение радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ	1	1	3	3	6	6	1,8	3,8	3,8	Магистрант	2	3	4	3	5	5
Моделирование переноса (пыли) радиоактивного загрязнения	2	2	3	4	4	5	2,8	3,8	3,8	Магистрант	2	2	4	3	3	4
Изучение результатов	1	1	2	3	3	3	1,4	3	3	Магистрант	2	2	2	3	5	5
Проведение расчетов по теме	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Магистрант	6	7	7	8	10	10
Анализ результатов	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Магистрант	3	3	3	1	1	1
Вывод по цели	1	1	1	4	4	4	1,8	1,8	1,8	Магистрант-рук.	4	4	4	1	1	1

Таблица 4.11 – Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ Ра-бот	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	2											
2	Анализ актуальности темы	Рук.-магистрант	6											
3	Поиск и изучение материала по теме	Магистрант-рук.	5											
4	Выбор направления исследований	Руководитель	3											
5	Календарное планирование работ	Руководитель	5											
6	Изучение литературы по теме	Магистрант	17											
7	Подбор нормативных документов	Магистрант-рук.	7											
9	Моделирование распространение радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ	Магистрант	5											
10	Моделирование переноса (пыли) радиоактивного загрязнения	Магистрант	7											
11	Изучение результатов	Магистрант	5											
12	Проведение расчетов по теме	Магистрант	20											
13	Анализ результатов	Магистрант	5											
14	Вывод по цели	Магистрант-рук.	3											

 – магистрант;  – руководитель.



### 4.3.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

#### 4.3.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (4.3.5)$$

где:  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы [22,24].

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 4.12 – Материальный затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы (З), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	лист	120	110	110	2	2	1	276	253	126,5
Картридж для принтера	шт.	1	1	1	700	700	700	805	805	805
Интернет	М/бит (пакет)	1	1	1	120	120	120	138	138	138
Ручка	шт.	1	1	1	15	15	15	22,5	22,5	22,5
Тетрадь	шт.	1	1	1	12	12	12	13,8	13,8	13,8
Компьютер	шт	1	1	1	27000	27000	27000	31050	31050	31050
Итого:								32305	32282	32155

#### 4.3.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, руб.			Общая стоимость оборудования, руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Математическая программа рассчитывающая уровень радиоактивного загрязнения	1	1	1	2000	1500	1700	2300	1725	1955
Итого:								2300	1725	1955

#### 4.3.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.13.

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
2.	Анализ актуальности темы	Рук.-магистр.	1	1	1	4,4			5	5	5
3.	Поиск и изучение материала по теме	Магистр.-рук.	2	2	2	4,4			5	5	5
4.	Выбор направления исследований	Руководитель	1	1	2	3,6			4	4	8
5.	Календарное планирование работ	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
6.	Изучение литературы по теме	Магистр	12	12	12	0,8			10,6	10,6	10,6
7.	Подбор нормативных документов	Магистр.р-рук.	2	2	4	4,4			9,8	9,8	19,6
8.	Изучение ПО	Магистр	3	5	5	0,8			2,6	4,4	4,4
9.	Моделирование распространение радиоактивное загрязнения	Магистр	2	4	5	0,8			1,8	3,5	4,4
10.	Моделирование переноса пыли радиоактивное загрязнение	Магистр	3	4	4	0,8			2,6	3,5	3,5
11.	Изучение результатов	Магистр	2	2	2	0,8			1,8	1,8	1,8
12.	Проведение расчетов по теме	Магистр	6	7	7	0,8			5,3	6,2	6,2
13.	Анализ результатов	Магистр	2	2	2	4,4			9,8	9,8	9,8
14	Вывод по цели	Магистр.-рук.	4	4	4	0,8			3,3	3,5	3,5
Итого:									77,6	83,1	97,8

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент [26]. Принимая во внимание, что за час работы руководитель получает 450 рублей, а студент 100 рублей (рабочий день 8 часов).

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3.6)$$

где:  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Максимальная основная заработная плата руководителя (доктора наук) равна примерно 48000 рублей, а студента 31700 рублей.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.3.7)$$

где :  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таким образом, заработная плата руководителя равна 53760 рублей, студента – 35504 рублей.

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.3.8)$$

где:  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2017 г. в соответствии с налоговым кодексом РФ глава 34, установлен размер отчислений во внебюджетные фонды равный 27,1% [28].

Таблица 4.15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб			Дополнительная заработная плата, руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель проекта	48000	57000	57000	5760	6840	6840
Магистрант-дипломник	31700	27200	28100	3804	3264	3372
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271					
Итого						
Исполнение 1	24190,5 руб.					
Исполнение 2	25556,4 руб.					
Исполнение 3	25829,5 руб.					

#### 4.3.4.5 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.3.9)$$

где:  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны:  $Z_{\text{накл}} = 145959,5 \cdot 0,16 = 23353,52$  руб.

#### 4.3.4.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 4.16 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	32305	32282	32155	Пункт 4.3.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	2300	1725	1955	Пункт 4.3.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	77600	83100	97800	Пункт 4.3.3

Продолжение таблицы 4.16

4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	9564	10104	10212	Пункт 4.3.3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	24190,5	25556,4	25829,5	Пункт 4.3.4
6. Накладные расходы	23353,5	24442,7	26872,2	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	169313	177210,1	194823,7	Сумма ст. 1- 6

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.4.1)$$

где  $I_{финр}^{исп.i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{финр}^{исп1} = \frac{194823,7}{194823,7} = 1; I_{финр}^{исп2} = \frac{169313}{194823,7} = 0,86; I_{финр}^{исп3} = \frac{177210,1}{194823,7} = 0,90.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (4.4.2)$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a^i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой ко- эффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Визуализация результатов	0,2	5	3	5
2. Удобство в эксплуатации	0,2	5	4	3
3. Интерфейс	0,15	5	4	4
4. Длительность расчетов	0,20	4	5	5
5. Автоматический расчет уравнений	0,15	5	4	4
6. Расчет перенос радиоактивное загрязнение	0,1	5	5	4
ИТОГО	1	4,8	4,1	4,2

$$I_{p-исп1} = 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,15 + 4 \times 0,2 + 5 \times 0,15 + 5 \times 0,1 = 4,8;$$

$$I_{p-исп2} = 3 \times 0,2 + 4 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 5 \times 0,1 = 4,1;$$

$$I_{p-исп3} = 5 \times 0,2 + 3 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 4 \times 0,15 + 4 \times 0,1 = 4,2.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{исп.i}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}}, \quad (4.4.3)$$

$$I_{исп1} = \frac{4,8}{1} = 4,8; I_{исп2} = \frac{4,1}{0,96} = 4,27; I_{исп3} = \frac{4,2}{1,05} = 4.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.4.18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.i}}{I_{исп.max}} \quad (4.4.4)$$

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,86	0,90
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	4,1	4,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,8	4,2	4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,09	1,2

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.



### **Заключение по главе**

По результатам выполненного задания для главы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были определены потенциальные потребители результатов исследования. Построена карта сегментирования рынка услуг, которая показывает что уровень конкуренции низок. Математическая программа рассчитывающая перенос радиоактивного загрязнения, как видно из сегментирования, программа, которая может моделировать распространения радиоактивного загрязнения от хвостохранилищ. Проведен краткий анализ конкурентных технических решений и комплексный анализ проекта, в котором показаны технические и экономические критерии оценки эффективности.

Проведен SWOT-анализ. Выявлена и описана корреляция между сильными и слабыми сторонами, возможностями и угрозами. Определены направления дальнейшего развития.

Построен линейный график проекта, с учетом длительности, начала и окончания, состава участников. На основании этих данных составлен календарный план-график проведения исследования ВКР по теме.

Произведена оценка бюджета проекта. Основными статьями расходов являются затраты на материалы, оборудование и электроэнергию, заработная плата, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы. Общая сумма затрат составляет 194823,7 рублей. Таким образом, в рамках данной главы были выполнены все поставленные задачи.

## **ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Магистерская работа связана с математическим моделированием, в основном, с работой за персональным компьютером (ПК), который находится в лаборатории биогеохимия и радиоэкология каб№307 «Биолого-почвенным институте НАН КР» г. Бишкек.

Для рабочих мест, оборудованных компьютерами (ПЭВМ или ПК), разработаны государственные Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (далее - Санитарные правила), которые являются основным документом при эксплуатации ПЭВМ. Точное название этого документа – «СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ». Он утвержден Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 N 118. Санитарные правила действуют на всей территории Российской Федерации и должны применяться как индивидуальными предпринимателями, так и юридическими лицами, которые эксплуатируют ПЭВМ [29].

### **5.1 Вредные и опасные факторы при работе с компьютером**

Основные требования Санитарных правил направлены на предотвращение или уменьшение вредных и опасных факторов для людей при работе с компьютерами.

Таблица 5.1 – Требования к ПЭВМ

Нормативные требования	Фактические значения
<p>Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать возможность поворота корпуса в горизонтальной и вертикальной плоскости с фиксацией в заданном положении для обеспечения фронтального наблюдения экрана ВДТ. Дизайн ПЭВМ должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4 - 0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики.</p>	<p>Конструкция ПЭВМ обеспечена возможностью поворота корпуса, окраска корпуса светло серого цвета и имеет матовую поверхность.</p>
<p>Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток.</p> <p>Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.</p>	<p>Имеет естественное и искусственное освещение. Окна выходят на северо-восток. Оконные проемы оборудованы жалюзи.</p>

Продолжение таблицы 5.1

<p>Искусственное освещение в помещениях с ПК должно быть равномерным. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и должно быть не более 300 лк, а освещенность поверхности стола в зоне рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. При искусственном освещении в качестве источника света рекомендуется применять люминесцентные лампы типа ЛБ или компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Допускается применение металлогалогенных ламп.</p> <p>В светильниках местного освещения можно применять обычные лампы накаливания, в том числе галогенные. Для помещений, где используются ПК, можно применять и светильники с зеркальными параболическими решетками, которые укомплектованы электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА). Применение светильников без рассеивателей и экранирующих решеток не допускается.</p>	<p>В лаборатории для искусственного освещения помещения с персональными компьютерами используются светильники прямого света, преимущественно отраженного света типа ЛПО34.</p>
<p>Помещения для занятий оборудуются одноместными столами, предназначенными для работы с ПЭВМ.</p>	<p>Лаборатория оборудована одноместными столами.</p>

Продолжение таблицы 5.1

<p>Конструкция одноместного стола для работы с ПЭВМ должна предусматривать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– две отдельные поверхности: одна горизонтальная для размещения ПЭВМ с плавной регулировкой по высоте в пределах 520 - 760 мм и вторая - для клавиатуры с плавной регулировкой по высоте и углу наклона от 0 до 15 градусов с надежной фиксацией в оптимальном рабочем положении (12 - 15 градусов);</li> <li>– (ширина обеих поверхностей должна быть одинаковой) и глубину не менее 550 мм;</li> <li>– опору поверхностей для ПЭВМ или ВДТ и для клавиатуры на стойку, в которой должны находиться провода электропитания и кабель локальной сети.</li> </ul> <p>Основание стойки следует совмещать с подставкой для ног;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие ящиков;</li> </ul> <p>увеличение ширины поверхностей до 1200 мм при оснащении рабочего места принтером.</p>	<p>Имеется две отдельные поверхности, ширина поверхностей для ВДТ и клавиатуры составляет 750 мм, имеется опора поверхности для ПЭВМ.</p>
--	---

Продолжение таблицы 5.1

<p>Высота края стола, обращенного к работающему с ПЭВМ, и высота пространства для ног и рабочий стул</p>	<p>В наличии высокий стол и регулирующийся стул, используется</p>
--	---

должны соответствовать росту обучающихся в обуви.	регулируемая по высоте подставка для ног.
Линия зрения должна быть перпендикулярна центру экрана и оптимальное ее отклонение от перпендикуляра, проходящего через центр экрана в вертикальной плоскости, не должно превышать $\pm 5$ градусов, допустимое $\pm 10$ градусов.	Линия зрения $+3$ .

Основные требования Санитарных правил направлены на предотвращение или уменьшение вредных и опасных факторов для людей при работе с компьютерами, которые можно разделить на следующие виды:

- электромагнитные и электростатические поля;
- негативное воздействие на зрение, возникающее при восприятии и отображении информации с экрана дисплея;
- недостаточность или неравномерность освещения рабочего места;
- избыточный шум и вибрация;
- несоответствие параметров микроклимата на рабочих местах (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха) действующим санитарным нормам;
- несоответствие рабочего места антропометрическим данным работника на ПЭВМ;
- монотонность труда.

Все эти факторы вызывают у работника повышенную утомляемость, расстройство памяти, головную боль, трофические заболевания, заболевания глаз, нарушения сна, боль в запястьях и пальцах, заболевания позвоночника,

центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем, внутренних органов и др.

Работы с ПЭВМ организуются в зависимости от вида и категории трудовой деятельности, для этого производятся исследования физических факторов рабочей среды.

### Нормативные документы [29]

Таблица 5.2 – Сведения о нормативной документации (НД) на методы измерения и нормирования

Измеряемый физический фактор среды	Наименование испытаний, параметров, характеристик, показателей	Перечень НД, регламентирующих параметры, характеристики, показатели	Перечень НД на методы испытаний и исследований
Освещение	КЕО, коэффициент пульсации, освещенность рабочей поверхности, освещенность экрана ПЭВМ	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» СП 52.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* "Естественное и искусственное освещение"	ГОСТ Р 54944-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения освещенности» ГОСТ Р 54945-2012 «Здания и сооружения Методы измерения коэффициента пульсации освещенности».
Микроклимат	Температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» МУК 4.3.2756-10 «Методические

			указания по измерению и оценке микроклимата производственных помещений»
Аэроионный состав воздуха	Концентрация аэроионов, $p^-$ , $p^+$ в 1 $см^3$ воздуха; коэффициент униполярности	СанПиН 2.2.4.1294-03 "Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений"	МУК 4.3.1675-03 «Общие требования к проведению контроля аэроионного состава воздуха»
Параметры электромагнитных полей от ПЭВМ	Напряженность электростатического поля; напряженность переменного электрического поля; плотность магнитного потока	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»

Параметров освещения помещений:

Таблица 5.3 – Искусственного освещения

	Нормативные значения
Освещенность рабочей поверхности, лк	300-500
Коэффициент пульсации, %	<5
Освещенность поверхности экрана, лк	<300



Заключение: Параметры световой среды соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» кроме коэффициента пульсации [29].

Таблица 5.4 – Естественного освещения

	Нормативные значения
КЕО, %	1

Заключение: Параметр световой среды, а именно естественная освещенность соответствует нормируемым величинам СП 52.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* «Естественное и искусственное освещение» [29].

Таблица 5.5 – Микроклимата помещений (рабочих мест)

	Высота от пола, м.	Нормативные значения
Температура окружающего воздуха, С	0,1	21-28
	1,0	21-28
Относительная влажность воздуха, %		15-75
Скорость движения воздуха, м/с	0,1	0,1
	1,0	0,1

Заключение: фактические параметры микроклимата по температурному режиму, относительной влажности воздуха и скорости движения воздуха соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [29].

Таблица 5.6 – Аэроионного состава воздуха

		Нормативные значения
Концентрация аэроионов в 1 см <sup>3</sup> воздуха, р (ион/см <sup>3</sup> )	p <sup>-</sup>	600 < p <sup>-</sup> ≤ 50000
	p <sup>+</sup>	400 ≤ p <sup>+</sup> < 50000
Коэффициент униполярности, У		0,4 ≤ У < 1,0

Заключение: Уровни содержания аэроионов в воздухе соответствуют санитарно-гигиеническим нормам по СанПиН 2.2.4.1294-03 «Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений» [29].

Таблица 5.7 – Электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПЭВМ

	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц			Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц		
	0,5м	1м	1,5м	0,5м	1м	1,5м
Напряженность переменного электрического поля, В/м	ПДУ 25			ПДУ 2,5		
	15	17	20	менее 0,8	менее 0,8	менее 0,8
Плотность магнитного потока, нТл	ПДУ 250			ПДУ 25		
	менее 80	менее 80	менее 80	менее 8	менее 8	менее 8
Напряженность электростатического поля, кВ/м	ПДУ 15					
	0,5м		1м		1,5м	
	0,25		0,32		0,20	

Заключение: Параметры по напряженности переменного электрического поля, напряженности электростатического поля и по показателю плотности магнитного потока соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [29].

Все параметры соответствуют нормируемым величинам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [29].

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену при работе с ПЭВМ устанавливается суммарное время регламентированных перерывов. В таблице приведено рекомендуемое время регламентированных перерывов [30].

Таблица 5.8 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПЭВМ

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	группа А, кол-во знаков	группа Б, кол-во знаков	группа В, ч	При 8- часовой смене	при 12-часовой смене
I	до 20000	до 15000	до 2	50	80
II	до 40000	до 30000	до 4	70	110
III	до 60000	до 40000	до 6	90	140

Моя деятельность относится к категории В и уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ до 6 часов, то категория работы с ПЭВМ – III.

При работе с ПЭВМ у работников возникает усталость от:

- электромагнитное излучение (в ой или иной степени оно есть);
- напряженность зрения;
- шум;
- стрессы (эмоциональное воздействие);
- гиподинамия (сидячее положение) и другие.

Для снижения утомления пользователя рабочую смену организуют путем чередования работы на ПК с другой работой. Если нет возможности чередования видов трудовой деятельности, то рекомендуется через каждые 45-60 минут работы устраивать перерывы по 10-15 минут. Продолжительность непрерывной работы на компьютере без регламентированных перерывов не должна превышать 1 часа [30].

#### Электробезопасность.

На рабочем месте пользователя размещены дисплей, клавиатура и системный блок. При включении дисплея на электронно-лучевой трубке создается высокое напряжение в несколько киловольт. Поэтому запрещается прикасаться к тыльной стороне дисплея, вытирать пыль с компьютера при его включенном состоянии, работать на компьютере во влажной одежде и влажными руками.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления при экранного фильтра [30].

Даже незначительное на первый взгляд поражение электрическим током является опасным для организма человека, так как последствия при поражении электрическим током на такие орган как легкие, сердце, нервная система, проявляются не сразу, а спустя некоторое время.

## **5.2 Экологическая безопасность**

Успешная деятельность лаборатория во многом зависит сегодня от того, насколько современное оборудование лаборатория. Не вполне очевидно, но чем современнее ваше оборудование, сканеры, мониторы и лабораторное оборудование и приборы, тем быстрее выполняются необходимые процессы. Именно вследствие этого электроника и электронное оборудование и заменяются руководством компании при первой возможности.

## **5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Сход оползня на хвостохранилище может произойти в любое время. Наибольшая вероятность сход оползня – после выпадения осадков и его замачивания, в случае землетрясения или при сочетании этих факторов.

Существующая угроза схода оползня, может повлечь за собой разрушение хвостохранилища. В связи с этим в первую очередь необходимо принять меры по ликвидации возможных последствий схода оползня.

В первую очередь необходимо выполнить такие мероприятия, которые позволили бы предотвратить образование подпорного водоема. Для этого предлагается в контуре схода оползня проложить трубопровод, который обеспечит пропуск как бытовых расходов воды, так и расходов более редкий повторяемости.

Оказавшись на зараженной местности радиации:

- быстро выходить из зоны заражения в сторону, перпендикулярную направлению ветра, закрывая органы дыхания подручными средствами (шарфом, тканью), смоченными в воде;
- по возможности оказать необходимую помощь детям, престарелым людям, инвалидам;

– после выхода из зоны заражения обратиться в медицинские учреждения для определения степени поражения и проведения лечебных или профилактических мероприятий.

Среди возможных ЧС наиболее вероятным является возникновение пожар. Пожар может произойти вследствие перегрева электродов или при коротком замыкании. Согласно правил эксплуатации электроустановок относится к помещениям приборы, т.е. токоведущие части электрооборудования. Поэтому особое внимание уделяется постоянному контролю заземлительных устройств. Для предотвращения возникновения пожара применяются следующие шаги: проверка персонала на предмет знаний пожарной безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами, плановый осмотр установок. Экспериментальная установка устойчива к возникновению пожара, т.к., все токоведущие части надежно изолированы и проверяются согласно плану.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех этажах висит «План эвакуации людей при пожаре», а также регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения средства пожаротушения.

Средства пожаротушения: Внутренние противопожарные краны установлены на лестничных клетках, у входов, в коридорах. При каждом кране имеется шланг длиной 10 м. Количество пожарных кранов принимается из расчета, чтобы любая точка производственного помещения могла быть залита водой из двух соседних пожарных шлангов.

– если все же возникнет пожар, персонал будет действовать в следующем порядке:

– сообщить о пожаре по телефону 01 в пожарную охрану;

- отключить все электроустановки;
- закрыть окна и двери, чтобы убрать сквозняк и доступ кислорода для горения;
- организовать эвакуацию из лаборатории и параллельно приступить к ликвидации очага пожара первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ОУ-5-ВСЕ, пожарный рукав). При невозможности – покинуть опасную зону.

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

К сожалению, в современной жизни преобладает сидячий образ работы. На табуретке или обычном стуле без вреда для здоровья можно провести не более 15 минут в день. Из-за отсутствия удобного сиденья со временем появляются дискомфорт, неприятные ощущения из-за долгого неподвижного положения, которые, в последствие, перерастают в более серьезные заболевания, поэтому работодатель обеспечил работника эргономическим креслом. Офисное эргономическое кресло имеет элементы управления, позволяющие легко регулировать высоту и наклон сиденья, также имеет регулировку спинки по высоте и углу наклона. Важно, чтобы сотрудник мог выполнять эти регулировки, находясь в положении сидя. Конструкция стула должна соответствовать выполнению любых задач.

В лаборатории за сохранность и правильное пользование ПЭВМ наблюдает ответственный человек, так же на рабочих местах имеются инструкции.

При работе с ПЭВМ у работников возникает усталость от:

- электромагнитное излучение (в ой или иной степени оно есть);
- напряженность зрения;

- шум;
- стрессы (эмоциональное воздействие);
- гиподинамия (сидячее положение) и другие.

Для снижения утомления пользователя рабочую смену организуют путем чередования работы на ПК с другой работой. Если нет возможности чередования видов трудовой деятельности, то рекомендуется через каждые 45-60 минут работы устраивать перерывы по 10-15 минут. Продолжительность непрерывной работы на компьютере без регламентированных перерывов не должна превышать 1 часа [30].

### **Заключение по главе**

В данной главы были определены опасные и вредные факторы, которые присущи работе за компьютером, проанализированы их воздействия на организм человека и возможные способы уменьшения этого воздействия. Еще рассмотрено объект который может произойти оползни на хвостохранилищах, вероятность воздействие на окружающей среды.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработана математическая модель переноса радионуклидов в приземном слое атмосферы под действием ветра.

Выполнено математическое моделирование процессов переноса распространения радиоактивных пыли с помощью компьютерной программы. Получены распределения распространения радиоактивного загрязнения в результате переноса загрязняющих веществ от хвостохранилища под действием ветра. В результате численного решения получены распределения концентраций полей скорости, концентрации загрязняющих веществ и уровней радиоактивного загрязнения в различные моменты времени. Применение данной математической модели позволяет оценить скорость распространения загрязняющих веществ от хвостохранилищ в зависимости от характеристик метеорологических условий.

С помощью представленной модели определены размеры зоны загрязнений от хвостохранилищ в окружающей среде. Данные результаты могут быть использованы для профилактических мероприятий по предотвращению распространения радиоактивных загрязнений от хвостохранилищ.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ**

1. Сартбаев М.Ж., Перминов В.А. Математическое моделирование переноса радиоактивного загрязнения под действием ветра// Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» - 2016.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство чрезвычайных ситуации Кыргызской Республики – [электронный ресурс] – URL: <http://mes.kg/ru/about/subordinate/agenstvo-pobrabasheniui-s-hvostochranilis/istoricheskya-spravka-hvostochranilisha/>
2. Васильев И.А., Борисова А.В., Ураков М.С., Шестаков А.А. Математическое моделирование физических процессов ветровой эрозии с поверхности хранилищ отработанных ураносодержащих руд. Радиозэкологические и смежные проблемы уранового производства. – Ч. II. – Бишкек.: Илим, 2000.
3. Kara-Balta – [электронный ресурс] – URL: [http://www.vniitf.ru/Karabalta/Rezult/KR715\\_2003/Task12.htm](http://www.vniitf.ru/Karabalta/Rezult/KR715_2003/Task12.htm)
4. Андерсон С.Р., Халлет Б. Общая модель переноса частиц ветром // Вашингтон, 1981. – 190 с.
5. Глазунов Г.П., Гендугов В.М. Механизмы ветровой эрозии почв // Почвоведение, 2001, №6.
6. Немировский А.В. Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 25.00.20 / А.В. Немировский; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» – (НИТУ «МИСиС») Москва: 2016. – 131с.
7. Мелентьев В.А., Калпашников Н.П., Волнин Б.А. Намывные гидротехнические сооружения. – М.: Энергия, 1973. – 215с.
8. Гальперин А.М. Щербакова Е.П. Экологические аспекты преобразования горнотехнических ландшафтов. – М., Горный журнал, 2004, № 12, с. 101-103.
9. Щербакова Е. П. Инженерно-геологическое и геоморфологическое обоснование техногенного рельефа намывных территорий гидроотвалов // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1998, № 6.

10. Каркашадзе Г.Г. Моделирование физических процессов горного производства. Часть 1. - Учебное пособие для студентов направления подготовки 131201 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» ФГОС ВПО. М.: МГГУ, 2013. – 98 с.
11. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. Год выпуска: 2009. Автор: Pryor, Roger W.: Engineering / FEM. Издательство: Jones and Bartlett Publishers, LLC\$.
12. Винников В.А., Каркашадзе Г.Г. Гидромеханика. Учебник для вузов. Изд.: М.: Московский государственный горный университет. 2003. 304 с.
13. Загузов И.С. Основы аэрогидромеханики. Часть II. Учебное пособие. Самара: «Универс-групп». 2005. – 140 с.
14. Бересневич П.В. «Охрана окружающей среды при эксплуатации хвостохранилищ» М., Недра, 1993. – 128с.
15. Чайкина Г.М., Обьедкова В.А., Гаранина И.А., Прибылев В.И. Экосистемы техногенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 1. 2005. – 105-108с.
16. Sedov L.G. Mechanics of Continuous Medium. – Moscow: Science. – 1976.
17. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, – New York: Hemisphere Publ. Co. – 1980.
18. Stone H.L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM Journal of Numerical Analysis. 1968. №5. p.530-558.
19. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
20. Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, Phys. Fluids, vol. 8, p. 2182.

21. Patankar, S. V. and Spalding, D. B. (1972a). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, p. 1787.

22. Гаврикова А.В. Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность / А.В. Гаврикова [и др.]. – Томск, Изд-во: Томский политехнический университет, 2014. – 73 с.

23. Кузьмин А.М. Методы поиска новых решений и идей. Методы менеджмента качества. А.М. Кузьмин. – 2003.

24. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.

25. Карпунина М.Г. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие. Под ред. М.Г. Карпунина. – М.: Энергия, 1980. – 175 с.

26. Мазур И.И. Управление проектами. И.И. Мазур [и др.]. – Учебное пособие – Москва: Омега-Л, 2004. – 664 с.

27. Томский политехнический университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documen>

28. Налоговый кодекс РФ от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 03.04.2017 г.) / гл. 34 НК РФ.// Консультант-плюс: справ.-правовая система.

29. Компьютерные нормы | HR-Portal// Название сайта: URL: <http://www.hr-portal.ru/article/kompyuternye-normy>

30. Работа за компьютером// Название сайта: URL: <http://userdocs.ru/informatika/36364/index.html>

## Приложение А

### Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1EM51	Сартбаев Мааматкул Женишбекович		

**Консультант кафедры ЭБЖ:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Перминов Валерий Афанасьевич	Доктор физико- математических наук		

**Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Данейкина Наталья Викторовна			

## **2. Physical and mathematical formulation of the problem**

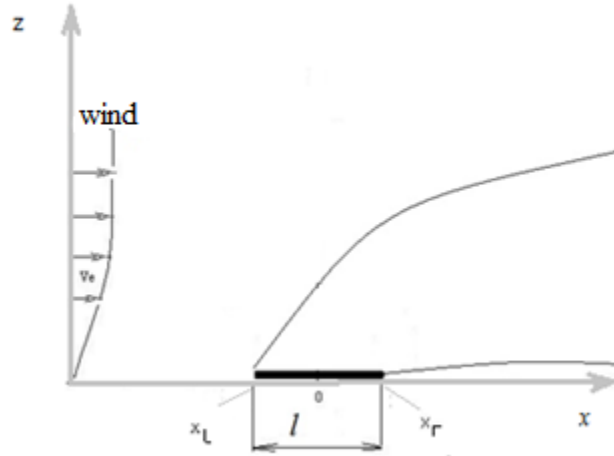
In this paper, we present a mathematical model for describing heat and mass transfer processes and predicting the distribution of velocity, temperature, and concentration of radioactive contaminants propagating under the influence of wind. This model is based on the analysis of known experimental data, using concepts and methods of mechanics of reacting media [11] and analysis of existing models of environmental pollution. Dust containing radioactive particles can rise under the influence of air currents and is transported over considerable distances.

It is believed that 1) the current is of a developed turbulent nature, molecular transfer is neglected, 2) the density of the gaseous phase does not depend on the pressure because of the low flow velocity in comparison with the speed of sound, 3) the subsidence of particles obeys the Stokes law.

Consider the problem for two coordinates: a horizontal component perpendicular to the earth's surface. In addition, the assumption of a two-dimensional configuration can be justified, given that the length of contaminated sites can be quite large. To describe convective transport, we use the Reynolds equations for turbulent flow. The area from which pollutants rise is modeled as a flat source of radioactive impurities.

### **2.1. Statement of the problem**

Let us consider the process of radionuclide propagation in the region under consideration. ( Figure 2.1). Let,  $l$  - the width of the zone containing polluting radioactive substances. At the left boundary of the region under consideration, the wind speed at a height  $h$  is given. Under the influence of wind, dust particles containing radioactive substances rise into the air and are transported in the direction of the  $x$  axis. The deposition of radioactive particles is taken into account.



**Figure 2.1 – Scheme of the calculation area**

The mathematical solution of problems is reduced to solving this system of equations:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (2.3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_0) \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_t \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_t \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (2.4)$$

$$w_0 = \frac{d_r^2 (\rho_0 - \rho) g}{18 \mu}, \quad (2.5)$$

This system of equations is solved taking into account the initial and boundary conditions:

$$t=0 \quad u=0, \quad w=0, \quad c=0; \quad (2.6)$$

$$x=0 : \quad u=u_\infty, \quad w=0, \quad c=0; \quad (2.7)$$



$$x=x_{\infty} : \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0; \quad (2.8)$$

$$z=0 \quad u=0, \quad w = \begin{cases} 0, & x \\ w_d, & x_l \leq x \leq x_r \end{cases} \quad (2.9)$$

$$c = c_0, \quad x_l \leq x \leq x_r; \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad x < x_l, \quad x > x_r; \quad (2.10)$$

$$z=z_{\infty} \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0; \quad (2.11)$$

where  $\rho$  – is the density of air,  $x, z$  – are the coordinates,  $u, w$  – are the projections of the velocity vector, respectively, on the  $x, z$ ,  $c$  – concentration,  $p$  – pressure,  $g$  – acceleration of gravity,  $\mu_t$  – turbulent viscosity coefficient,  $D_t$  – turbulent diffusion coefficient;  $w_0$  – particle sedimentation rate;  $w_d$  – particle lift speed;  $\rho_0, d_r$  – density and diameter of dust particles.

## 2.2. The method of solving the problem

For numerical integration of the initial system of equations, the control volume method [12] is used. The entire design area is divided into disjoint reference volumes. A typical reference volume is shown in Figure 2.2.

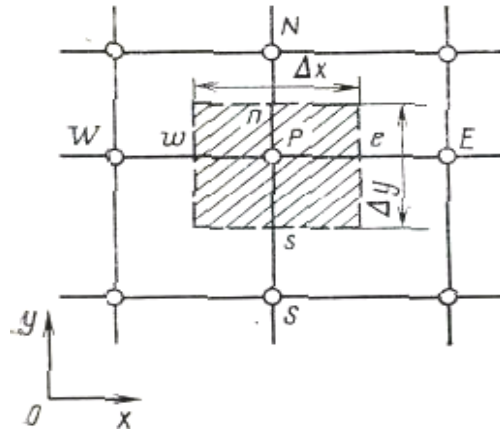


Figure 2.2 – Control volume (shaded area) for the two-dimensional case

Each of the differential equations of the system (2.1) - (2.4) is written as a generalized differential equation:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (2.12)$$

Here  $\Phi$  is a generalized function corresponding to the required variables ( $u$ ,  $w$ ,  $c$ ). Further, each differential equation is integrated over all control volumes. As a result, we obtain systems of algebraic equations for all the unknown dependent variables in the form of a discrete analogue, which can be written in the following form:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b, \quad (2.13)$$

where

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [|-F_e, 0|]; \quad (2.14)$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [|F_w, 0|]; \quad (2.15)$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [|F_n, 0|]; \quad (2.16)$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + [|F_s, 0|]; \quad (2.17)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + a_P^0 \Phi_P^0, \quad (2.18)$$

Here  $\Phi_P^0$  and  $\rho_P^0$  denote known values for time  $t$ , and all other quantities ( $\Phi_P$ ,  $\Phi_E$ ,  $\Phi_w$ ,  $\Phi_N$ ,  $\Phi_S$  and, etc.) are unknown quantities for time  $t + \Delta t$ . Mass expenditures  $F_e$ ,  $F_w$ ,  $F_n$  and  $F_s$  are determined by equations (2.14-2.18). We represent the corresponding conductivities in the form

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e}; \quad D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w}; \quad D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta x)_n}; \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta x)_s}; \quad (2.19)$$

and the Peclet numbers by

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}; \quad P_w = \frac{F_w}{D_w}; \quad P_n = \frac{F_n}{D_n}; \quad P_s = \frac{F_s}{D_s}. \quad (2.20)$$

The function  $A(|P|)$  can be selected from Table for the desired scheme. The power-law scheme is recommended, for which

$$A(|P|) = [0, (1 - 0,1|P|)^5]. \quad (2.21)$$

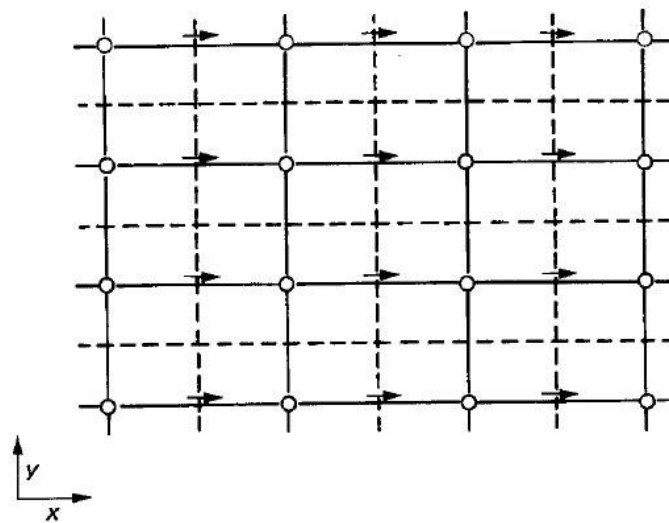
It should be noted that even at this stage the physical meaning of the various coefficients in (2.13) is understandable. The coefficients at the neighboring points  $a_E$ ,  $a_W$ ,  $a_N$  and  $a_S$  take into account the effect of convection and diffusion for the four faces of the reference volume, which depend on the mass flow rate  $F$  and conductivity  $D$ . The term  $a_P^0 \Phi_P^0$  characterizes the known value of  $\Phi$  for the control volume (for time  $t$ ), referred to the time step. The remaining terms can be interpreted in a similar manner [12]. The resulting system of algebraic equations was solved on each time layer using the SIP method [13].

Also formulated the procedure for solving the general differential equation for  $\phi$  in the presence of a given flowfield. However, except in some very special circumstances, it is not possible to specify the flow field; rather, we must calculate the local velocity components and the density field from the appropriate governing equations. The velocity components are governed by the momentum equations, which are particular cases of the general differential equation for  $\phi$  (with  $\phi = u$ ,  $\Gamma = \mu$  and so on). Thus, we are tempted to conclude that we already have developed the method for solving the momentum equations, thereby getting the velocity field [14].

If the nonlinearity of the momentum equations appears to be a difficulty, we only have to remind ourselves that, while treating heat conduction, we saw how to handle nonlinearity by iteration. In particular, the convection coefficient  $\rho u$  being a function of the dependent variable  $u$  of the momentum equation is no different from the conductivity  $k$  being a function of the temperature  $T$ . Starting with a guessed velocity field, we could iteratively solve the momentum equations to arrive at the converged solution for the velocity components. The pressure gradient forms a part of the source term for a momentum equation. The pressure field is indirectly specified via the continuity equation. When the correct pressure field is substituted

into the momentum equations, the resulting velocity field satisfies the continuity equation. This indirect specification, however, is not very useful for our purposes unless we attempt a direct solution of the whole set of the discretization equations resulting from the momentum and continuity equations. Since we have preferred iterative methods of solving the discretization equations even for a single dependent variable, the direct solution for the entire set of velocity components and pressure seems out of the question [14].

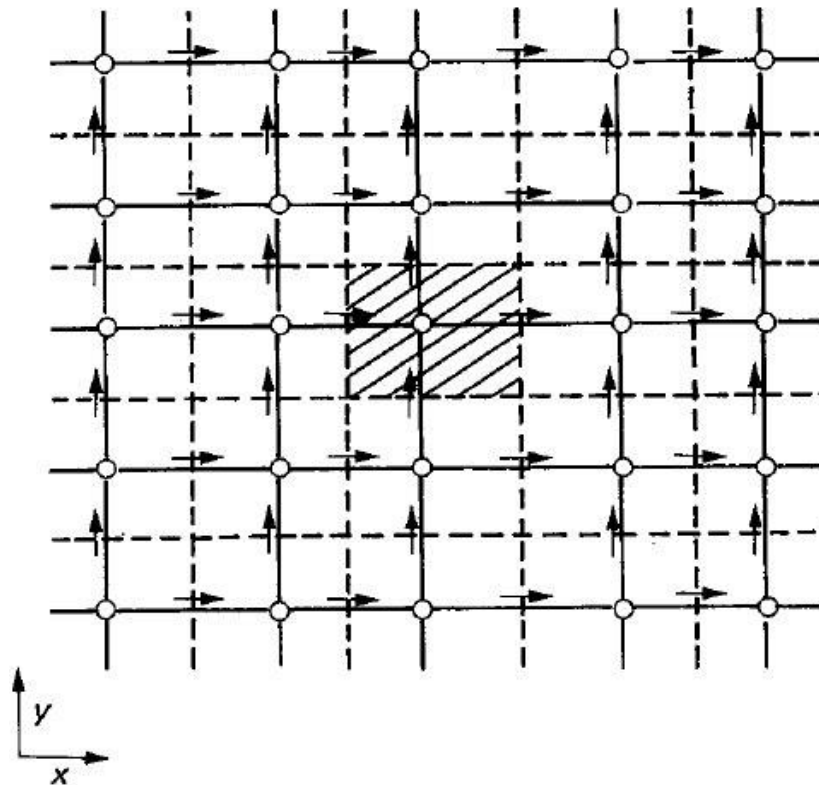
The difficulties described so far can be resolved by recognizing that we do not have to calculate all the variables for the same grid points. In the case of the velocity components, there is a significant benefit to be obtained by arranging them on grids that are different from the grid used for all other variables. Such a displaced or "staggered" grid for the velocity components was first used by Harlow and Welch (1965) [15]. In the staggered grid, the velocity components are calculated for the points that lie on the faces of the control volumes. Thus, the x-direction,



**Figure 2.3 – Staggered locations for  $u$**

Velocity  $u$  is calculated at the faces that are normal to the  $x$  direction. The locations for  $u$  are shown in Fig.2.3 by short arrows, while the grid points (hereafter called the main grid points) are shown by small circles; the dashed lines indicate the control-volume faces. It will be noticed that, with respect to the main grid points, the

$u$  locations are staggered only in the  $x$  direction. In other words, the location for  $u$  lies on the  $x$ -direction link joining two adjacent main grid points. Whether the  $u$  location is exactly midway between the grid points depends upon how the control volumes are defined. The  $u$  location must lie on the control-volume face, irrespective of whether the latter happens to be midway between the grid points. It is easy to see how the locations for the velocity components  $v$  and  $w$  are to be defined. In Fig. 2.4, a two-dimensional grid pattern is shown



**Figure 2.4 – The location of  $u$  and  $w$  in the staggered order: the notations are the same as in Figure 2.3, the vertical arrows are the places of determination of  $w$**

The locations for  $u$  and  $w$  placed on the respective control-volume faces.

An immediate consequence of the staggered grid is that the mass flow rates across the control-volume faces can be calculated without any interpolation for the relevant velocity component. However, this feature, although it offers some convenience in setting up the general discretization equation for  $\phi$  is not an important advantage of the staggered grid. The important advantages are twofold.

For a typical control volume (shown shaded in Fig.2.4) it is easy to see that the discretized continuity equation would contain the differences of adjacent velocity components, and that this would prevent a wavy velocity field, from satisfying the continuity equation. In the staggered grid, only "reason-able" velocity fields would have the possibility of being acceptable to the continuity equation. The second important advantage of the staggered grid is that the pressure difference between two adjacent grid points now becomes the natural driving force for the velocity component located between these grid points. Consequently, pressure fields such as those, would no longer be felt as uniform pressure fields and could not arise as possible solutions.

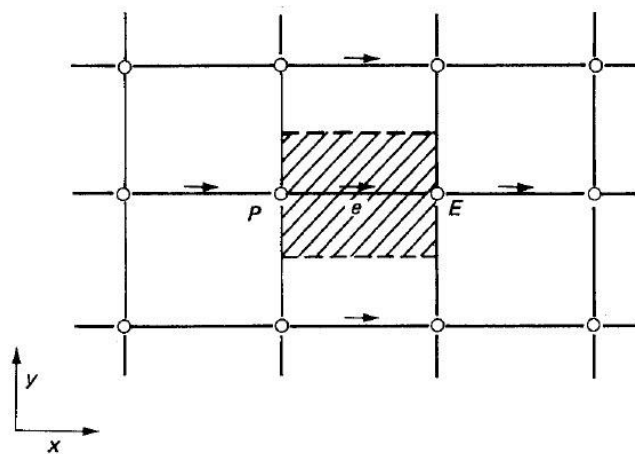


Figure 2.5 – Control volume for  $u$

Unusual about this control volume. Its faces lie between the point  $e$  and the corresponding locations for the neighbor  $u$ 's. The control volume is, however, staggered in relation to the normal control volume around the main grid point  $P$ . The staggering is in the  $x$  direction only, such that the faces normal to that direction pass through the main grid points  $P$  and  $E$ . This layout realizes one of the main advantages of the staggered grid: The difference  $p_P - p_E$  can be used to calculate the pressure force acting on the control volume for the velocity  $u$ .

The calculation of the diffusion coefficient and the mass flow rate at the faces of the  $u$  control volume shown in Fig.2.5 would require an appropriate interpolation. The resulting discretization equation can be written as

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P - p_E) A_e . \quad (2.22)$$

where  $(p_P - p_N) A_n$  is the appropriate pressure force. The momentum equations can be solved only when the pressure field is given or is somehow estimated. Unless the correct pressure field is employed, the resulting velocity field will not satisfy the continuity equation. Such an imperfect velocity field based on a guessed pressure field  $p^*$  will be denoted by  $u^*, v^*$ . This "staggered" velocity field will result from the solution of the following discretization equations:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e , \quad (2.23)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_N^*) A_n , \quad (2.24)$$

In these equations, the velocity components and pressure have been given the superscript. Then we discuss the way of improving the guessed pressure  $p^*$  such that the resulting staggered velocity field will progressively get closer to satisfying the continuity equation. Let us propose that the correct pressure  $p$  is obtained from

$$p = p^* + p' . \quad (2.25)$$

where  $p'$  will be called the pressure correction. Next, we need to know how the velocity components respond to this change in pressure. The corresponding velocity corrections  $u', v'$  can be introduced in a similar manner:

$$u = u^* + u' ; v = v^* + v' \quad (2.26)$$

Then we subtract Eq. (2.23) from Eq. (2.22), we have

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (p_P' - p_E') A_e . \quad (2.27)$$

The result is

$$a_e u_e' = (p_P' - p_E') A_e. \quad (2.28)$$

Or

$$u_e' = d_e (p_P' - p_E'), \quad (2.29)$$

where

$$d_e \equiv \frac{A_e}{a_e}. \quad (2.30)$$

Equation (2.29) will be called the velocity-correction formula, which can also be written as

$$u_e = u_e^* + d_e (p_P' + p_E'). \quad (2.31)$$

This shows how the starred velocity  $u$  is to be corrected in response to the pressure corrections to produce  $U_e$ .

The correction formulas for the velocity components in other directions can be written similarly:

$$v_n = v_n^* + d_n (p_P' - p_N'), \quad (2.32)$$

Thus, we now have all the preparation needed for obtaining a discretization equation for  $p'$ . It is to this task that we now turn.

We shall now turn the continuity equation into an equation for the pressure correction. The continuity equation is

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (2.33)$$

We shall integrate this over the shaded control volume shown in Fig. 2.6



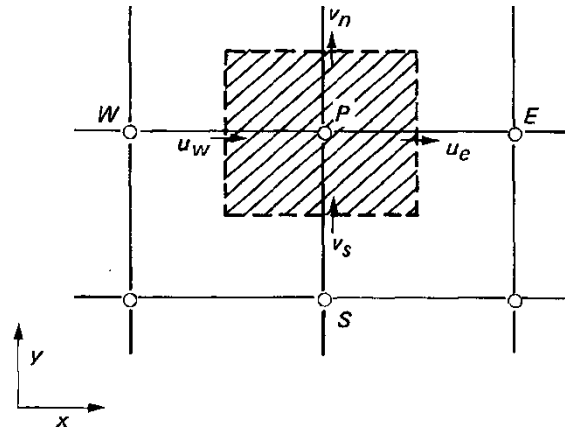


Figure 2.6 – Control volume for the continuity equation. With these decisions, the integrated form of Eq. (2.6) becomes

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P - \rho_P^0) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_s] \Delta y \\ + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (2.34)$$

If we now substitute for all the velocity components the expressions given by the velocity-correction formulas [such as Eqs. (2.31)-(2.33)], we obtain, after rearrangement, the following discretization equation for  $p'$ :

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S, \quad (2.35)$$

Where

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad (2.36a)$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad (2.36b)$$

$$a_S = \rho_s d_s \Delta x, \quad (2.36c)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, \quad (2.36d)$$

$$\begin{aligned} b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \\ + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x. \end{aligned} \quad (2.36e)$$

The procedure that we are developing for the calculation of the flow field has been given the name SIMPLE, which stands for Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations. We shall discuss the significance of the name a little later. The procedure has been described in Patankar and Spalding (1972)[16]. The Sequence of Operations. The important operations, in the order of their execution, are:

1. Guess the pressure field  $p^*$ .
2. Solve the momentum equations, such as Eqs. (2.23)-(2.24), to obtain  $u^*$ ,  $v^*$ .
3. Solve the  $p'$  equation.
4. Calculate  $p$  from Eq. (2.25) by adding  $p'$  to  $p^*$ .
5. Calculate  $u, v$  from their starred values using the velocity-correction formulas (2.28)-(2.29).
6. Solve the discretization equation for other  $\phi$  (such as temperature, concentration, and turbulence quantities) if they influence the flow field through fluid properties, source terms, etc. (If a particular  $\phi$  does not influence the flow field, it is better to calculate it after a converged solution for the flow field has been obtained.)
7. Treat the corrected pressure  $p$  as a new guessed pressure  $p^*$ , return to step 2, and repeat the whole procedure until a converged solution is obtained.

In other words, instead of using Eq. (2.25), we employ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (2.37)$$

with  $\alpha_p$  set equal to about 0.8. Thus, the computations proceed to convergence via a series of continuity-satisfying velocity fields. This feature of SIMPLE has many advantages.

Test checks of the calculation program were carried out by comparison with analytical solutions, as well as with known numerical solutions of problems. In

addition, to estimate the accuracy of the difference schemes used and to verify the correctness of the program as a whole, the method of a priori of given analytic solutions was used. The equations used were substituted for analytic expressions of unknown functions, the residual of equations was calculated, which was then treated as a fictitious source in each equation.