



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ООП/ОПОП Технологии сжижения природного газа и промышленная теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Математическое моделирование воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара на инфраструктурные объекты железной дороги с учетом структурной неоднородности

УДК 519.876:630.435:656.21

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		31.05.2023

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Барановский Н.В.	к.ф-м.н.		31.05.2023

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		31.05.2023

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		31.05.2023

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Максимов В.И.	к.т.н.		31.05.2023

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистранта по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проектировать, методически и консультационно обеспечивать, организовывать и вести учебно-профессиональную, проектную, исследовательскую деятельность обучающихся, в том числе при подготовке выпускной квалификационной работы по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-2	Способен осуществлять планирование и научное руководство работ в соответствующей области знаний
ПК(У)-3	Способен осуществлять планирование и контроль работ по безопасной эксплуатации и своевременному ремонту оборудования, основываясь на анализе возможности проведения ремонтных и диагностических работ на технологических объектах с учетом режимов работы объектов
ПК(У)-4	Способен осуществлять проектирование и эксплуатацию теплотехнического, тепломеханического, теплообменного основного и вспомогательного оборудования, а также технологических установок, работающих под избыточным давлением, в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве, в теплоэнергетике, газовой, химической и атомной промышленности
ПК(У)-5	Способен осуществлять анализ режимов работы с формулированием предложений по повышению эффективности деятельности и модернизации предприятий с учетом современных инновационных подходов



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная Школа Энергетики

Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

ООП/ОПОП Технологии сжигания природного газа и промышленная теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-исследовательский центр И.Н.Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

Максимов В.И.

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ14	Мязина Софья Андреевна

Тема работы:

Математическое моделирование воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара на инфраструктурные объекты железной дороги с учетом структурной неоднородности	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 41-35/с от 10.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<p>Объект исследования – инфраструктурный объект железной дороги.</p> <p>Предмет исследования – теплоперенос в трехслойной структуре инфраструктурного объекта железной дороги под воздействием конвективного теплового потока от фронта пожаров.</p>
--------------------------	---

Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений научного сообщества в рассматриваемой области. Математическое моделирование теплопереноса в инфраструктурном объекте железной дороги, находящейся в высокотемпературной среде, с учетом структурной неоднородности. Обсуждение результатов исследования. Формулировка выводов и заключения.
--	---

Перечень графического материала	Презентация
---------------------------------	-------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Т.Б.
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.12.2022
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Барановский Н.В.	к.ф.-м.н.		14.12.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		14.12.2022



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ООП/ОПОП Технологии сжижения природного газа и промышленная теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Период выполнения весенний семестр 2022/2023 учебного года

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ14	Мязина Софья Андреевна

Тема работы:

Математическое моделирование воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара на инфраструктурные объекты железной дороги с учетом структурной неоднородности

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	31.05.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
06.09.2021	Титульные листы, реферат, введение,	10
23.12.2021	Аналитическая часть магистерской диссертации	10
08.01.2023	Проектная часть магистерской диссертации, заключение, список использованных источников, приложения	10
05.04.2023	Раздел «Социальная ответственность»	5
31.05.2023	Представление готовой магистерской диссертации	5
14.06.2023	Защита магистерской диссертации	60
	Итого	100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Барановский Н.В.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Максимов В.И.	к.т.н.		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 132 с., 61 рис., 38 табл., 108 источников, 1 прил.

Ключевые слова: лесные пожары, математическое моделирование, инфраструктурный объект железной дороги, поражающий фактор лесного пожара, пиролиз.

Объектом исследования являются элементы инфраструктурного объекта железной дороги.

Цель работы – расчет влияния лесного пожара на элементы инфраструктурного объекта железной дороги для оценки экологических последствий лесных пожаров и их прогнозирования.

В процессе исследования проводился расчет параметров процесса тепломассопереноса в неоднородном по структуре здании железной дороги.

В результате исследования были получены распределения температуры в слоях инфраструктурного объекта железной дороги при воздействии конвективного теплового потока от фронта лесного пожара, что позволяет оценить степень термического повреждения и прогнозировать экологические последствия лесных пожаров.

Основные технологические характеристики: программная реализация математических моделей разработана с помощью среды MatLab.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: полученные результаты могут быть применены при создании информационно-вычислительных систем геомониторинга лесных массивов.

Экономическая значимость работы заключается в том, что результаты проектирования могут быть использованы для усовершенствования уже существующих, а так же для создания новых систем прогноза пожарной опасности, применение которых поможет снизить ущерб лесных пожаров.

В будущем планируется осуществить интеграцию разработанных математических моделей в системы геоэкологического мониторинга.

Оглавление

Введение	10
Обозначения и сокращения	11
1 Современное состояние области исследования	12
1.1 Типы и характеристика лесных пожаров	12
1.2 Типы и характеристика лесных горючих веществ (ЛГМ).....	16
1.3 Сушка древесных и лесных горючих материалов.....	18
1.4 Пиролиз древесины, древесных и лесных горючих материалов	21
1.5 Зажигание лесных горючих материалов	25
1.6 Характеристика территорий WUI.....	28
1.7 Воздействие лесных пожаров на населенные пункты и промышленные объекты.....	31
1.8 Технологии ГИС в прогнозе лесных пожаров и их последствий	34
1.9 Распространение лесных пожаров	38
1.10 Инфраструктура железной дороги.....	41
1.11 Конструкционные материалы	48
1.12 Выводы по результатам аналитического обзора литературы	48
2 Методы исследования	50
2.1 Объект исследования	50
2.2 Метод конечных разностей	51
2.3 Граничные условия второго, третьего и четвертого рода	54
2.4 Задача с химической реакцией в материале	56
2.5 Двухслойная пластина	56
2.6 Испарение материала	57
2.7 Двумерная задача для однородного тела	58
2.8 Двумерная задача для неоднородного тела	59
2.9 Задача с зависящими от температуры коэффициентами теплопроводности	60
3 Результаты исследования.....	62
3.1 Физическая модель теплопереноса в слоистой структуре деревянного строения железной дороги при воздействии излучения от фронта лесного пожара	62
3.2 Двумерная постановка задачи исследования процесса теплопереноса в структуре деревянного строения железной дороги при воздействии фронта лесного пожара	62
3.2.1 Геометрия области решения.....	62
3.2.2 Математическая модель теплопереноса в структуре деревянного строения железной дороги при воздействии фронта лесного пожара	62
3.2.3 Основные закономерности теплопереноса в структуре деревянного строения железной дороги при воздействии фронта лесного пожара	62

3.3 Двумерная постановка задачи исследования процесса теплопереноса в структуре деревянного строения железной дороги с оконным проёмом при воздействии фронта лесного пожара	62
3.3.1 Геометрия области решения.....	62
3.3.2 Математическая модель теплопереноса в структуре деревянного строения железной дороги с оконным проёмом при воздействии фронта лесного пожара.....	62
4 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	64
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	64
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	65
4.3 SWOT – анализ	66
4.4 Планирование научно-исследовательских работ	68
4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	68
4.4.2 Разработка графика проведения научного исследования.....	69
4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	73
4.5.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	73
4.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	73
4.5.3 Основная заработная плата исполнителей.....	74
4.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	76
4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	76
4.5.6 Накладные расходы.....	77
4.5.7 Формирование затрат на проектирование.....	77
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	78
Выводы по разделу.....	79
5 Социальная ответственность.....	83
Введение.....	83
5.1 Вредные факторы	83
5.1.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении.....	83
5.1.2 Превышение уровней шума.....	84
5.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений	85
5.1.4 Недостаточная освещенность.....	86
5.2 Электроопасность и поражение электрическим током	88
5.3 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.....	89
5.4 Экологическая безопасность	91
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	92
Заключение.....	94

Список публикаций	95
Список литературы.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А	105

Введение

Одной из наиболее значимых и самых опасных угроз для лесов, а также их биологического разнообразия является лесной пожар.

Согласно сводке ФБУ «Авиалесоохрана» по данным на 25.03.2023 зафиксированы наиболее сложные регионы с лесными пожарами: Забайкальский край, Свердловская и Амурская области [1].

В 21 регионе России продолжают работы по тушению 71 лесного пожара на площади 10 482 га. 23 мая были ликвидированы 94 лесных пожара на площади 4186 га [1].

С начала 2023 года по 24 мая на территории России возникло 4489 лесных пожаров на площади 877 547 га. Из них ликвидировано 4418, из которых 86,2% — в первые сутки [1].

Информация и статистика о лесных пожарах, особенно о низовых, включая влияние огня на почвенные слои, в организациях, занимающихся составлением статистики представлена с большими пробелами. Для определения очагов пожаров и их последствий необходим более полный мониторинг с использованием современных систем поиска и отслеживания очагов пожаров. Некоторая информация о лесных пожарах скрывается различными организациями в корыстных целях.

Поэтому для более полного и точного изучения влияния очага пожара на инфраструктурные объекты железной дороги мы используем математическое моделирование и разрабатываем расчетную модель данного опыта.

Обозначения и сокращения

ЛГМ – лесные горючие материалы;

МКР – метод конечных разностей.

1 Современное состояние области исследования

1.1 Типы и характеристика лесных пожаров

Лесные пожары считаются одной из наиболее распространенных опасностей в лесном ландшафте. Они представляют серьезную угрозу для леса, его флоры и фауны. Незапланированные и внезапные лесные пожары являются основной причиной деградации лесов, в то время как контролируемый пожар для управления и сдерживания распространения нежелательных лесных пожаров служит средством улучшения состояния лесов. Существует несколько как материальных, так и нематериальных потерь в результате лесных пожаров, и они создают экологическую угрозу для пострадавшего района [2]. Наиболее важные действия по предотвращению лесных пожаров и борьбе с ними:

- Определение пожароопасных зон и их картографирование.
- Сбор данных об ущербе от лесных пожаров.
- Разработка и установка инструментов оценки опасности для лесов.
- Разработка и внедрение систем прогнозирования лесных пожаров.
- Мероприятия, связанные с охраной лесов, должны быть включены в запланированную деятельность для обеспечения распределения бюджета.
- Профилактические меры должны быть приняты задолго до начала пожароопасного сезона (т.е. летом).
- Назначение сотрудника для координации с различными ведомствами по вопросам, связанным с лесными пожарами.
- “Комитет по борьбе с пожарами”, который должен быть создан на каждом из уровней, а именно на уровне села/города, округа, для мониторинга, а также контроля за пожаром. Им следует предоставить достаточные ресурсы для борьбы с пожарами.
- Должна быть создана коммуникационная сеть для обеспечения своевременного потока информации, рабочей силы и материалов к местам возгорания.
- Комитеты должны быть обучены и привлечены для борьбы с лесными пожарами и управления ими. В частности, люди, живущие рядом с лесами, должны быть неотъемлемой частью таких комитетов.
- Следует организовать регулярное обучение сотрудников лесного хозяйства и других членов комитета по противопожарной защите, чтобы информировать участников о новой информации и инструментах защиты лесов от пожаров.

- Необходимо повышать осведомленность общественности о защите лесов от пожаров.
- Строгие юридические меры, которые должны быть приняты для предотвращения лесных пожаров. [2-3].

Неконтролируемое горение способно нанести колоссальный вред как жизни и здоровью граждан, так интересам общества и государства. Данному стихийному бедствию может предшествовать ряд предпосылок, которые усиливаются различными техническими, организационными, хозяйственными факторами. К ключевым факторам и предпосылкам можно отнести рельеф местности, тип лесного массива, влажность, ветер, погодные условия и т.д. [4-7].

Источники лесных пожаров могут быть природного или антропогенного происхождения. Стоит отметить, более 90 % пожаров происходит по причине деятельности человека.

Очень важно понять взаимосвязь между основными экологическими факторами и пространственным поведением лесного пожара, для того чтобы разработать эффективные планы по борьбе с лесными пожарами [2].

Наиболее полная классификация лесных пожаров, существующую уже более семи десятилетий была предложена И.С. Мелеховым в 1947 году, она представлена на рисунке 1.1 [8-10].



Рисунок 1.1 – Классификация лесных пожаров

На рисунке 1.2 представлен пример верхового пожара [11].



Рисунок 1.2 – Верховой пожар

Характеристики устойчивого верхового пожара: температура горения $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость распространения $\sim 1,5\text{ км/ч}$, распространяется при небольшом ветре. Передвигается вместе с низовым пожаром сплошной стеной. [12].

Температура беглого верхового пожара характеризуется $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вытянутой формой, во время сильного ветра распространение по кронам деревьев верхних ярусов [13]. Движение пламени – скачкообразное, а скорость скачка – 20 км/ч , но порой достигает больших значений. [14] Формированию верховых пожаров способствуют сухая погода, ветер, захламленность лесов и т.д. [14].

На рисунке 1.3 представлен пример низового пожара [12].



Рисунок 1.3 – Низовой пожар

Температура низового устойчивого пожара – $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость передвижения – несколько десятков м/ч и овальная форма.

Низовой беглый пожар характеризуется температурой 400-500°C, скоростью распространения 0,5 км/ч.

На рисунке 1.4 представлен пример почвенного (торфяного) пожара [16].



Рисунок 1.4 – Почвенный (торфяной) пожар

Почвенные пожары – это тип огня, который горит в органических почвах, корнях, гнилых погребенных бревнах, из почвы могут прорываться языки пламени. Такие пожары характерны большой опасностью и имеют высокую температуру около 1000 °С [17].

На рисунке 1.5 представлен пример огненного вихря [17].



Рисунок 1.5 – Огненный вихрь

Огненный смерч – это особый вид устойчивых и чрезвычайно разрушительных пожаров, который характеризуется наличием продуктов сгорания, притоком воздуха, а так же возникновением восходящего столба нагретого воздуха [19].

Появление огненного торнадо были зафиксированы во время Великого лондонского пожара, Канберре 2003 г., Московского пожара в 1812 г. и многие другие случаи.

В [20] были проведены исследования оптических и физических характеристик смерча, где с помощью двигателя с лопатками проводилась закрутка пламени внешним

воздушным потоком. Максимальная температура, полученная в ходе исследования, достигла 800-1100 К.

Классификация лесных пожаров по категориям сложности тушения и площади поражения огнём [21]:

1. Начинающийся пожар ($S = 1,5$ га);
2. Малый пожар ($S = 1,5-3,0$ га);
3. Средний пожар ($S = 3,0-25,0$ га);
4. Крупный пожар ($S = 25,0-200,0$ га);
5. Особо крупный пожар ($S =$ более 200 га).

1.2 Типы и характеристика лесных горючих веществ (ЛГМ)

В таблице 1.1 представлена характеристика лесных горючих материалов.

Таблица 1.1 – Типы и характеристика лесных горючих веществ [22-25]

Лесные горючие вещества		Характеристика
Почвенный горючий материал		
	Торф	<p>Торф разделяют по различному составу растений. Также, на тип торфа может влиять состав минеральной почвы и коренной породы, под торфяником и на почве, прилегающей к торфянику.</p> <p>На степень температуры влияют химические характеристики</p> <p>Физические свойства меняются в зависимости от типа торфа и состояния окружающей среды.</p> <p>Удельная масса составляет около $1,48-2,25 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$</p> <p>Объемная плотность составляет $0,07-0,62 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$</p> <p>Общая пористость 74,2 - 95,3%.</p> <p>Зольность 2,2 - 72,6%</p>
Напочвенный горючий материал		
	Опад, напочвенный покров, мелкие кустарнички	<p>Кустарнички и травы характерны для непокрытых лесом территорий.</p> <p>Чаще расположены на территориях после пожаров и вырубок.</p> <p>С течением времени опад превращается в подстилку, а подстилка – это верхний слой почвы, который состоит из отмерших частей растений.</p>
Горючий материал в кронах хвойного молодняка		
	Подрост сосны, кедра	<p>Сосна обыкновенная имеет плотные, жесткие хвоинки изогнутой формы. На ветках они живут до 3 лет, но при хороших условиях могут и до 8 лет.</p> <p>Хвоя хорошо воспламеняется, потому что в ней накапливается большое количество эфирных масел и смолы, которые являются хорошим горючим.</p>

Все сведения о запасах лесного горючего материала наносятся на карты растительных горючих материалов [26-28]. С их помощью можно оценивать класс пожарной опасности данного биогеоценоза и прогнозировать лесные пожары [29].

1.3 Сушка древесных и лесных горючих материалов

Для того, чтобы осуществить систему прогнозирования пожарной опасности в лесной зоне, важно изучить процесс сушки лесных горючих материалов.

Сушка является одним из методов снижения влажности древесины, осуществляется с помощью подвода нагретого воздуха к древесине. Древесная биомасса неоднородна по размеру и имеет высокую влажность [25].

На рисунке 1.6 представлена классификация лесных горючих материалов [27].

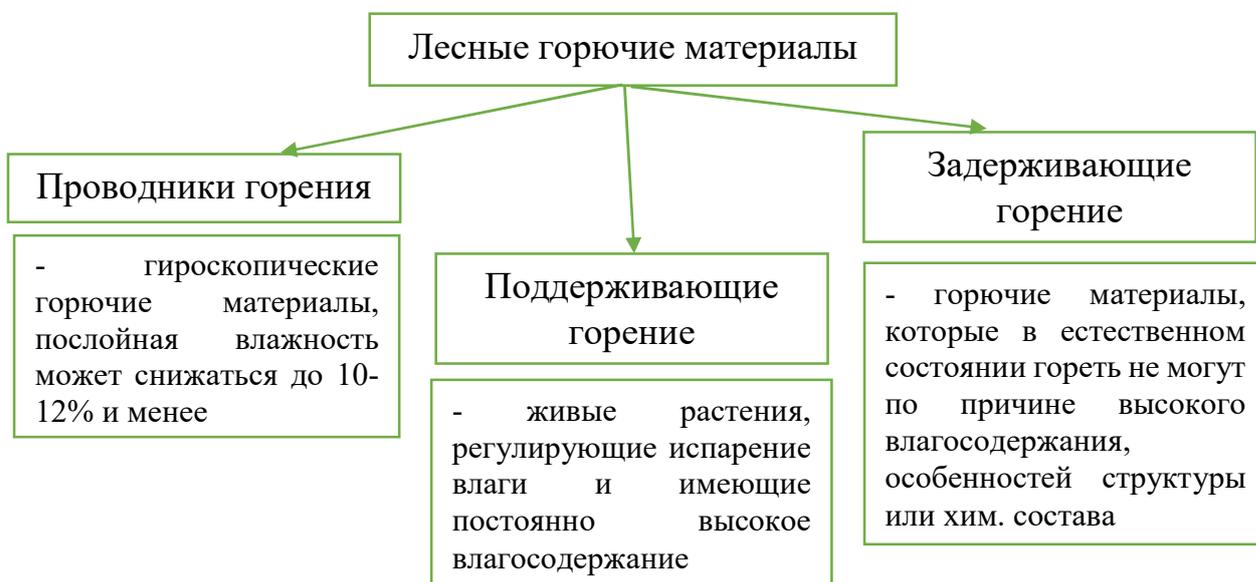


Рисунок 1.6 – Классификация лесных горючих материалов

На сегодняшний день при прогнозе пожарной опасности в лесной местности используется комплексный метеорологический показатель В.Г.Нестерова [30]:

$$\Gamma_j [K^2] = \Gamma_{j-1} \xi_j + T_j (T_j - T_{pj})$$

Где T_j, T_{pj} – температура воздуха и точки росы 13÷15ч местного времени текущего дня; ξ – коэффициент учета осадков.

В [30] был рассмотрен слой лесных горючих материалов из смеси, которая нагревается за счёт излучения Солнца и обдувается ветром (рис. 1.7). Высота слоя – h , скорость ветра – v_c , учитываются процессы переноса и испарения воды и теплофизические параметры составляющих смеси. Задача рассматривается в плоскости xz с рядом допущений. Рассматривались сопряженная и отдельная постановки задачи.

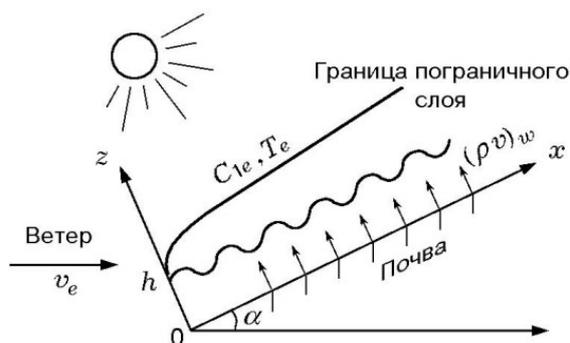


Рисунок 1.7 – Схема слоя лесных горючих материалов [30]

Главная цель [31] – определить длительность сушки лесных горючих материалов, при котором показатель влагосодержания слоя будет менее критического. Во время проведения эксперимента была найдена убыль массы лесных горючих материалов (m/m^0) от времени. Согласно полученным данным, масса убывает по экспоненциальному закону и выходит на стационарное значение. Значит, при увеличении температуры скорость испарения воды увеличивается и сокращается время сушки [31].

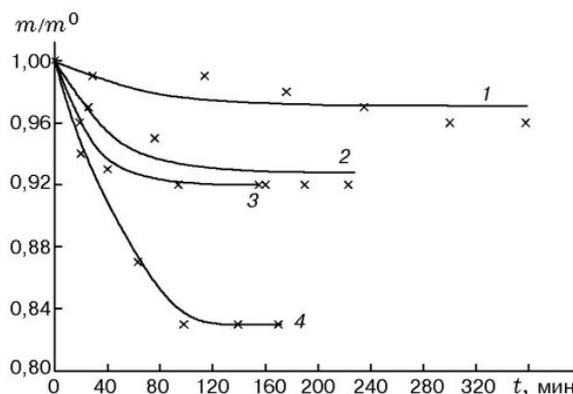


Рисунок 1.8 – Результаты эксперимента процесса сушки слоя хвои сосны $T_1 = 30^\circ\text{C}$; $T_2 = 52^\circ\text{C}$; $T_3 = 70^\circ\text{C}$; $T_4 = 96^\circ\text{C}$; [32-33]

Численное моделирование проводилось в условиях различных ситуаций пожарной опасности, разных видов почв. На рисунке 1.9 представлено изменение массовой концентрации паров воды (а) и отношения объёмной доли воды в связанном с веществом состоянии к критическому значению (б) [32-33].

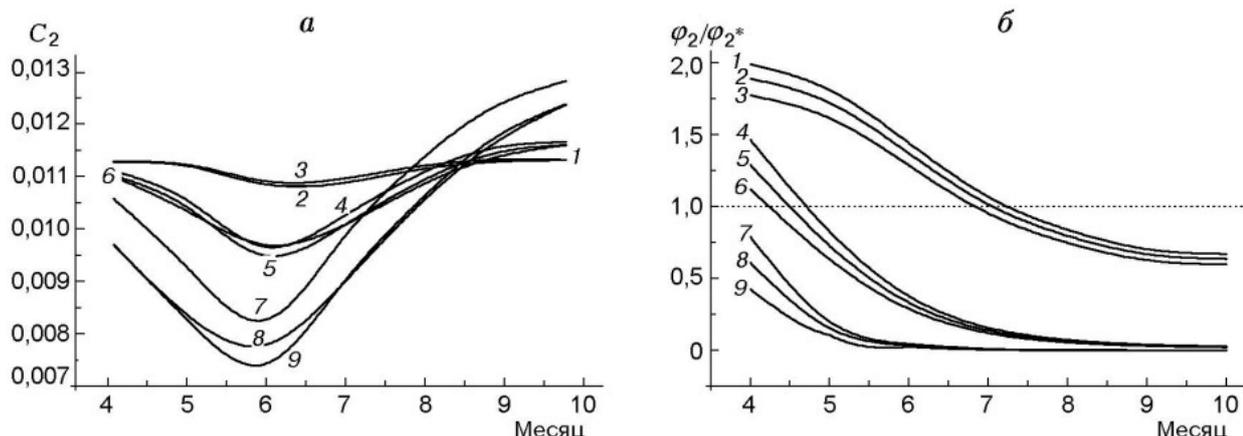


Рисунок 1.9 – Изменение массовой концентрации паров воды и отношения объёмной доли воды [32-33]

На рисунке 1.9 изображены пожарные опасности на глинистых, типичных и песчаных почвах кривые 1-3 – низкая интенсивности; кривые 4-6 – средняя интенсивности; кривые 7-9 – высокая интенсивности

Кривые позволяют прогнозировать пожарную опасность, анализируя данные о температуре воздуха и характеристик исследуемой местности.

В математическом моделировании лесных пожаров сушку ЛГМ можно описать соотношением [34]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{AmSM}{\sqrt{2\pi MRT}} p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

где m – масса, S – площадь поверхности, M – молекулярная масса воды, A – коэффициент аккомодации, E_2 – эффективная теплота испарения, p_0 – парциальное давление воды во внешней среде, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в предположении, что при высоких температурах, сопровождающих фронт лесного пожара, давление насыщенного пара

$$p_n = p_0 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \gg p_c,$$

где p_c – парциальное давление влаги.

Лесные экосистемы выполняют несколько функций, необходимых для поддержания целостности экосистемы планеты. Таким образом, лесные пожары представляют значительную опасность для всего живого. Борьба с лесными пожарами является первоочередной задачей современного общества. Прогнозирование лесных пожаров - один

из наиболее эффективных способов решения этой актуальной проблемы. Для повышения качества прогнозирования необходимо разработать современные системы прогнозирования, поэтому необходимо обобщить знания о процессах происходящие во время пожара [35].

В данной статье [35] рассматриваются ключевые особенности процессов, предшествующих воспламенению лесного топлива (сушка и пиролиз), и самого воспламенения, а также подходы к их экспериментальному и математическому моделированию.

Анализ литературных источников в предложенной статье по этой теме показал, что ученые всего мира заинтересованы в изучении особенностей процессов, происходящих в лесном топливе непосредственно перед и во время лесного пожара.

Проанализированные исследования показывают, что процессы сушки и пиролиза в значительной степени определяют дальнейшее воспламенение лесных топлив, а так же вносят значительный вклад в решение проблемы борьбы с лесными пожарами. Полученные результаты могут быть применены как в системах прогнозирования, так и при разработке методов пожаротушения [35].

1.4 Пиролиз древесины, древесных и лесных горючих материалов

Для того, чтобы вести борьбу с различными пожарами, необходимо знать как изменяется поведение древесины во время воздействия высоких температур [36].

Во время пожара древесина подвергается пиролизу, который является термохимической реакцией, превращающей древесину в уголь, конденсирующиеся жидкости (смола) и газы. В то время как, влага с растений испаряется, следовательно, они подвержены двухстадийному процессу термического разложения (пиролиз и сжигание) при воздействии высоких температур [37-38].

Пиролиз – это физико-химический процесс термического разложения, который не требует присутствия кислорода, является эффективным методом утилизации древесных отходов. Продукты пиролиза могут так же реагировать с O_2 и даже образовывать пламя, если присутствует источник возгорания при высоких температурах [39-41].

В исследовании [42] были проведены экспериментальные исследования термокинетических характеристик пиролиза и окисления лесных горючих материалов (хвои, сосны) с учетом влияния размера частиц (60-140 мкм) и плотности (206-955 кг/м³) лесного топлива. Согласно результатам измерений, энергия активации пиролиза игл

находится в диапазоне 22,8 – 113,8 кДж/моль, а энергия окисления соответствует 134,7 – 211 кДж/моль. Кинетические параметры, полученные для хвои в этой работе, могут быть использованы для моделирования термического разложения хвои и ее окисления во время лесных пожаров [42].

В [43] было проведено исследование теплового поведения необработанной и обработанной огнезащитными составами древесины разных пород с использованием синхронного термического анализа в инертной и окислительной атмосфере. Рассчитаны кажущиеся энергии активации разложения образцов и скорость тепловыделения. Представление о действии изученных огнезащитных составов. Остатки кокса после пиролиза исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Было установлено, что структура поверхности коксового остатка точно повторяет структуру биологических макроструктур древесины и уникальна для каждого вида, а элементы, входящие в состав пропитки, остаются на поверхности древесины [43].

В другой работе [44] целью исследования является изучение продуктов и кинетики термического разложения сибирского лесного топлива. Были выведены кинетические параметры процесса, определены основные этапы уничтожения лесного топлива. Измеренные кинетические параметры могут быть использованы в моделях лесных пожаров. [44].

Описать процесс пиролиза ЛГМ можно системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_{i0}}{dt} = -k_1 m_{i0} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), t = 0, m_{i0} = m_{iH}, \\ \frac{dm_{i0}}{dt} = a_c m_{i0} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), t = 0, m_{iC} = 1, \end{cases}$$

где a_c – отношение молекулярных масс и стехиометрических коэффициентов конденсированного продукта пиролиза и исходного вещества; m_{i0} – текущая масса сухого органического вещества в элементе ЛГМ; k_1 , E_1 – пред экспоненциальный множитель и энергия активации пиролиза; m_{iC} – текущая масса кокса, получающегося при пиролизе ЛГМ; m_{iH} – текущая масса сухого органического вещества в элементе ЛГМ в начальный момент времени.

Предложенные уравнения действительны в случае, когда время процесса переноса в ЛНМ меньше времени пиролиза.

Для прогнозирования и оценки опасности от лесных верховых пожаров необходимо изучить термическую деградацию различных видов лесного топлива в условиях высокой

температуры окружающей среды. В данной работе [45] были исследованы основные характеристики пиролиза, сопровождающегося испарением влаги в образце листовой покрытосемянных растений (березы), в условиях, типичных для верхового пожара.

Область решения (березовый лист) была представлена в виде трехслойной пластины. Область решения представлена на рисунке 1.10.

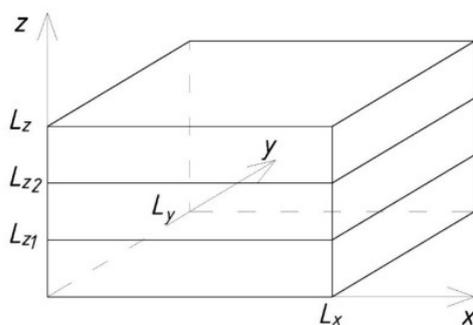


Рисунок 1.10 – Геометрия области решения [45]

На рисунках 1.11-1.13 показаны распределения объемных долей фаз сухого органического вещества, воды и газообразных продуктов в разных плоскостях образца при времени экспозиции 0,2 с и температуре 1000 К.

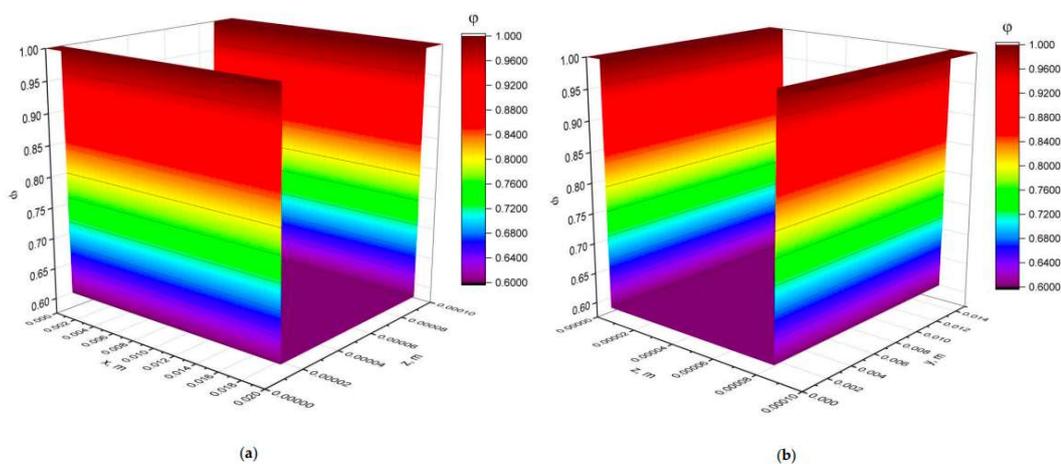


Рисунок 1.11 – Распределение сухого органического вещества в плоскостях xz (а) и yz (б) листовой пластинки листа березы ($T_{ff} = 1000 \text{ K}$, $t = 0,2 \text{ c}$) [45]

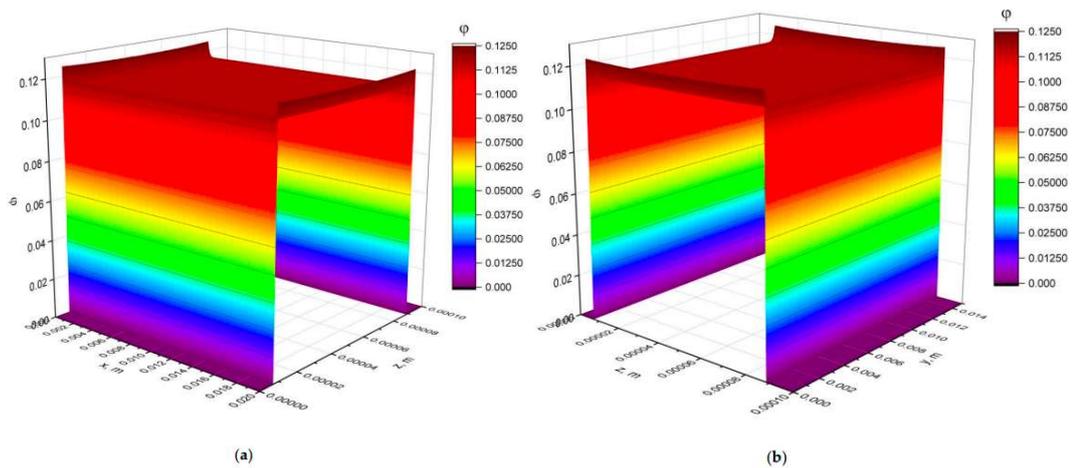


Рисунок 1.12 – Распределение воды в плоскости xz (а) и yz (б) листовой пластины березы ($T_{eff} = 1000 \text{ K}$, $t = 0,2 \text{ c}$) [45]

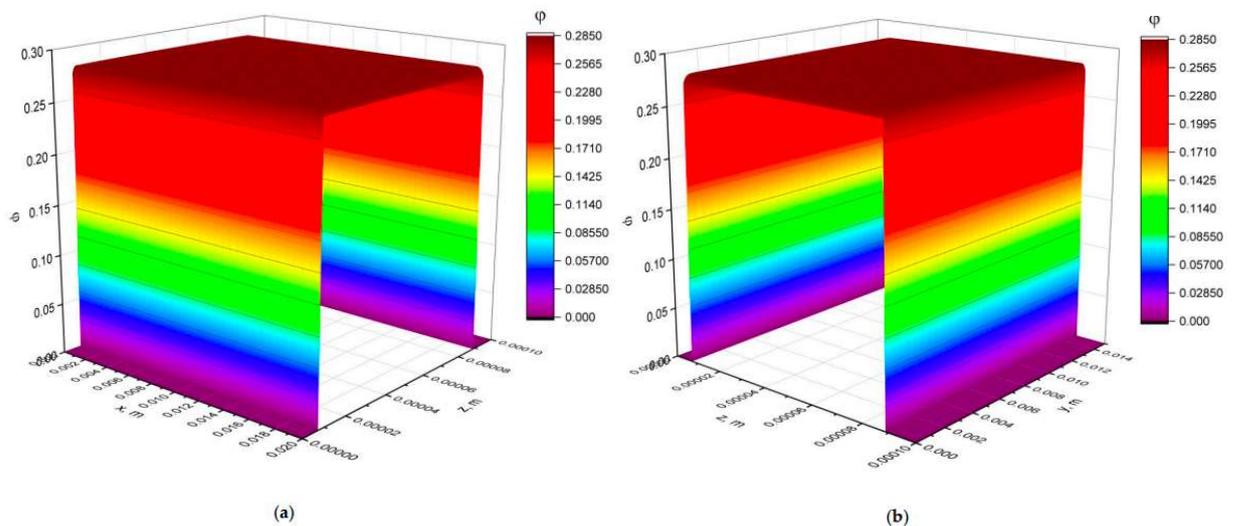


Рисунок 1.13 – Распределение парогазовой смеси в плоскостях xz (а) и yz (б) листовой пластины березы ($T_{eff} = 1000 \text{ K}$, $t = 0,2 \text{ c}$) [45]

Пиролиз рассматривается как наиболее важная стадия лесного пожара перед непосредственным возгоранием лесного топлива. Этот процесс сопровождается образованием частиц сажи. Такие частицы оказывают негативное воздействие на здоровье населения в непосредственной близости от лесных пожаров.

Целью этой статьи [46] было исследование процесса тепло- и массообмена, происходящего в типичном лесном топливном элементе (березовый лист).

Основными результатами исследования были:

1) физические и математические модели предложены для моделирования пиролиза лесного топлива с учетом образования сажи и условий, соответствующих различным лесным пожарам;

2) компьютерная программа, закодированная на высокоуровневом языке программирования Delphi;

3) полученные распределения температуры по толщине листа;

4) объемные доли, полученные для различных компонентов, зависящих от временных и пространственных координат.

Качественный анализ зависимостей показал, что распределение температуры в структуре листьев березы аналогично для всех типов лесных пожаров и отличаются только абсолютной величиной. Интенсивность процесса образования сажи напрямую зависит от типа лесного пожара. Представленные результаты должны быть полезны при прогнозировании и оценке пожарной опасности лесов, в том числе вблизи объектов Российских железных дорог [46].

1.5 Зажигание лесных горючих материалов

Для того, чтобы добиться самовозгорания лесных пожаров необходима очень высокая интенсивность. Наиболее распространенное зажигание в лесных пожарах, когда горючие материалы нагреваются излучающими и/или конвективными источниками тепла, а также присутствуют источники возгорания. Зажигание происходит при более низкой температуре, чем самовозгорание. Этот чрезвычайно сложный процесс зависит от нескольких факторов, в том числе: характеристик топливного слоя, на который приземляется уголь (температура, плотность, пористость, содержание влаги), размера и состояния уголька (тлеющего/тлеюще-горящего) и условий окружающей среды (температура, влажность, скорость ветра).

Существует три типа механизмов зажигания: с помощью раскаленной части возникает зажигание с внешним источником повышенной температуры в газовой фазе; тлеющее зажигание; длительное тление с последующим самопроизвольным переходом в пламя [47].

Главной причиной возникновения/появления лесных пожаров – расположение местности, однако, существуют и другие факторы, которые способны повлиять, а именно: умышленные поджоги; неосторожное использование огня и тепла (сигареты, спички, костры, технику, неконтролируемое сжигание сельскохозяйственных культур и плох

выполненные предписанные правила по соблюдению пожарной безопасности) и молнии [48].

Рассмотрим основные результаты исследования зажигания лесных горючих материалов.

В [49] приведены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения пылевидной топливной смеси на основе угля и биомассы – лесного горючего материала. В качестве второго компонента топлива были использованы отходы различных лиственных или хвойных пород деревьев.

Эксперименты проводились на оборудовании, обеспечивающем достаточно низкий уровень погрешности при регистрации основных характеристик процессов тепло- и массообмена, происходящих совместно при воспламенении биоугольного топлива во время термической подготовки. Установлено, что добавление биомассы к углю приводит к значительному сокращению (до 30%) всего периода воспламенения топливной смеси. Видеозапись процессов воспламенения позволила выявить основные этапы термической подготовки и воспламенения частиц биоугольного топлива. Установлено, что частицы биомассы (листья или еловые иголки) воспламеняются быстрее, чем уголь [49].

На основе результатов детального анализа видеogramм процесса воспламенения биоугольных смесей разработана математическая модель, описывающая совместное протекание основных процессов тепло- и массообмена в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений. Было проведено численное моделирование процесса воспламенения и установлено время задержки воспламенения. [49].

В работе [50] была рассмотрена математическая модель, а так же выведены численные результаты зажигания полога леса в условиях разрыва газопровода с образованием «огненного шара» (ОШ), при учете свойств лесного массива и коэффициента ослабления излучения пологом леса. Для определения безопасных расстояний от объектов повышенной опасности (ОПО) была разработана компьютерная программа [50]. В таблице 1.2 представлены доверительные интервалы времен задержки зажигания ЛГМ (листья березы) частицы [51].

Таблица 1.2 – Доверительные интервалы времен задержки зажигания листьев березы

T_0, K	Доверительный интервал t_{ign} , с, для частицы размером	
	$d = 8 \text{ мм}, h = 17 \text{ мм}$	$d = 6 \text{ мм}, h = 13 \text{ мм}$
1113	$\pm 0,054$	Нет зажигания
1153	$\pm 0,083$	$\pm 0,065$

Продолжение таблицы 1.2

1193	$\pm 0,022$	$\pm 0,075$
1233	$\pm 0,027$	$\pm 0,022$
1273	$\pm 0,021$	$\pm 0,011$
1293	$\pm 0,011$	$\pm 0,027$

В таблице 1.3 представлены доверительные интервалы времен задержки зажигания ЛГМ (сосновая хвоя) частицы [51].

Таблица 1.3 – Доверительные интервалы времен задержки зажигания сосновой хвои

T_0, K	Доверительный интервал t_{ign}, c , для частицы размером	
	$d = 8 \text{ мм}, h = 17 \text{ мм}$	$d = 6 \text{ мм}, h = 13 \text{ мм}$
1113	$\pm 0,061$	Нет зажигания
1153	Опыт не проводился	$\pm 0,171$
1193	$\pm 0,093$	$\pm 0,115$
1233	$\pm 0,090$	$\pm 0,041$
1273	$\pm 0,137$	$\pm 0,065$
1293	$\pm 0,022$	$\pm 0,057$

В исследовании [52] исследуются взаимозависимые физические и химические процессы, происходящие, когда типичное гелевое топливо воспламеняется горячей частицей. В проведенных экспериментах высокоскоростная видеозапись позволила установить последовательные закономерности и характеристики воспламенения гелевого топлива на основе органического полимерного загустителя стальной частицей в форме диска радиусом и высотой 5 мм. Время задержки воспламенения топлива составляет 0,5–2,5 с при изменении начальной температуры стальной частицы от 1230 до 1500 К [52].

Математическая модель исследуемого процесса был разработан с использованием полученных экспериментальных данных. В нем описываются взаимозависимые процессы кондуктивного нагрева и плавления гелевого топлива, испарения расплава, охлаждения частицы и ее постепенного погружения в приповерхностный слой топлива, образования горячей парогазовой смеси вокруг локального источника нагрева и ее воспламенения в условиях диффузионно-конвективного тепло– и массообмена. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может быть использована на практике для прогнозирования характеристики воспламенения гелевого топлива горячими частицами, когда группа факторов в системе частицы – топливо – воздух изменяется в широких пределах [51].

Лесные пожары возникают в результате антропогенной нагрузки и грозовой активности. Формирование грозового фронта обусловлено влиянием ряда факторов, в том числе выбросом аэрозольных частиц при лесных пожарах.

В рамках исследования [53] было проведено сценарное численное моделирование процессов тепло- и массообмена в одной головне с учетом образования частиц сажи. Авторы получили следующие вероятности возникновения лесных пожаров: 0,2 для поверхностного лесного пожара, 0,4 для верхового лесного пожара и 0,148 для огненного шторма.

1.6 Характеристика территорий WUI

Лесные пожары представляют собой значительный риск для безопасности населения, прилегающего к районам дикой природы, известным как граница между дикой местностью и городом wildland urban interface (WUI).

В [54] для решения сложных проблем, возникающих в масштабе домовладельцев WUI, предлагается подход к проектированию, основанный на производительности (PBD), который предполагает использование инструментов вычислительной гидродинамики (CFD), таких как FDS, для количественного выявления уязвимостей. Анализ европейских пожаров WUI представлен вместе с определением нескольких шаблонных сценариев, которые могут быть выведены из них. На основе этого анализа представлены примеры сценариев пожара PBD, характерных для микромасштабов средиземноморского WUI, включая системы остекления, кровлю и водосточные желоба, внешние конструкции, прилегающие к основному зданию, и пробелы, присутствующие в ограждающей конструкции здания. На рисунке 1.14 представлена геометрия симулятора динамики пожара [54].

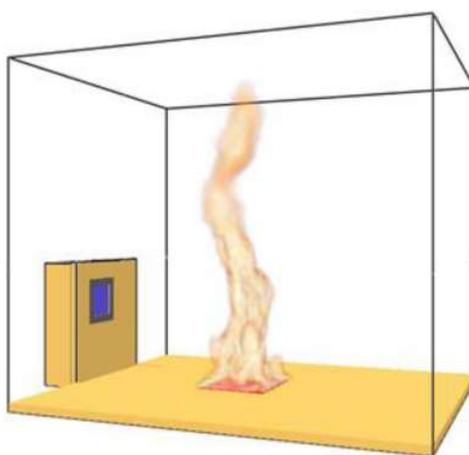


Рисунок 1.14 – Геометрия симулятора динамики пожара [54]

В качестве проработанного примера анализируется сценарий, включающий систему остекления, подверженную возгоранию в результате сжигания бытового топлива. Критерии эффективности для незащищенного стекла, одинарного стекла и толщиной 3 мм приведены в таблице 4. Выход из строя системы остекления произойдет при соблюдении одного из этих критериев [50].

В таблице 1.4 приведены критерии эффективности для однопанельного стекла толщиной 3 мм [54].

Таблица 1.4 – Критерии эффективности для однопанельного стекла

Температура поверхности [°C]	ΔT между серединой и краем [°C]	Полученная доза тепла [(кВт/м ²) ^{4/3} с]
150	58	1840

Тепловая доза зависит от полученного теплового потока и времени воздействия, как указано в уравнении:

$$\text{Heat dose} = I^{\frac{4}{3}} \cdot t \left[\left(\frac{kW}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} s \right]$$

В [55] представлена платформа моделирования под названием WUI-NITY. Платформа построена на Игровой движок Unity3D имитирует и визуализирует поведение человека и распространение лесного пожара во время эвакуации Сообщества WUI. WUI-NITY демонстрирует осуществимость и преимущества объединения моделирования слоев. Основной вклад этой работы заключается в разработке модульной и независимой от модели (т.е. не привязанной к конкретной модели) платформы с согласованными уровнями детализации (позволяющей сопоставлять разрешение моделирования в представлении каждого слоя) во всех трех слоях моделирования [55].

В исследовании [56] основная цель состояла в том, чтобы продвинуть быстрый и бесплатный метод оценки подверженности лесным пожарам в рамках WUI для развивающихся мегаполисов. В нем сравниваются лесные поверхности в двух столичных регионах Западных Балкан, а именно в Сараево и Тиране, они представлены на рисунке 1.15 [56]. Это исследование следует многокритериальному подходу и объединяет различные причины возникновения или распространения лесных пожаров, основанные на антропогенных, гидрометеорологических, геофизических и топливных свойствах исследуемой территории.

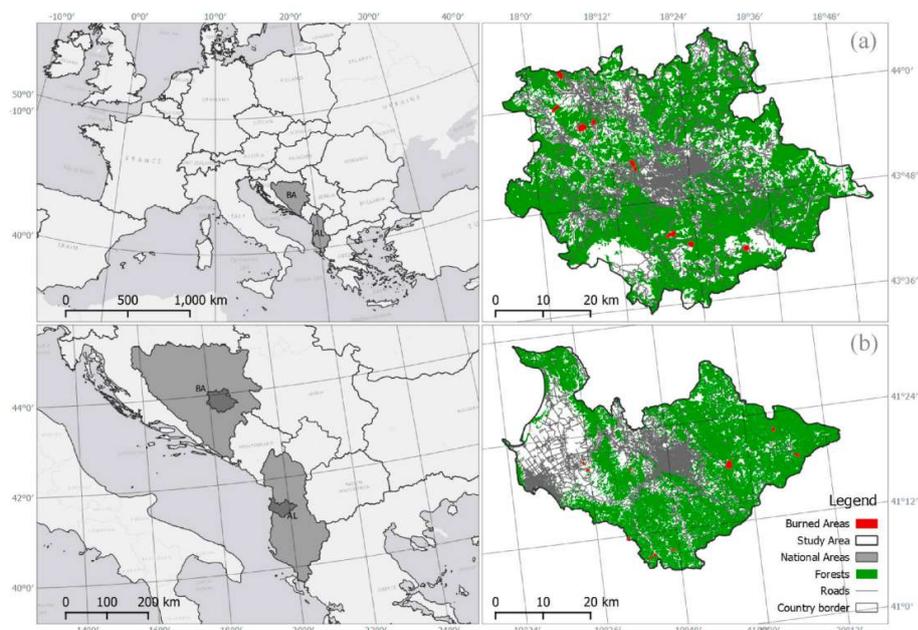


Рисунок 1.15 – Область сравнительного исследования столичных районов Сараево (а) и Тираны (б) в Европе [56]

Согласно результатам, в Сараево в четыре раза больше открытых зданий, чем в Тиране. Однако открытые здания в Тиране демонстрируют более высокие показатели риска, чем в Сараево. Результаты анализа ROC свидетельствуют о том, что относительные взвешенные коэффициенты на каждый критерий зависят от контекста и должны быть рассчитаны с учетом местных случаев лесных пожаров [56].

Это исследование предполагает, что планирование урбанизации и транспортной сети оказывает непосредственное влияние на риск лесных пожаров для городского интерфейса растительных диких земель (WUI). В этом исследовании рекомендуется определить подверженные лесным пожарам районы лесных массивов мегаполисов, которые должны быть рассмотрены директивными органами, ответственными за снижение риска бедствий на уровне мегаполисов [56].

Во всем мире ведется работа по разработке эффективных методов прогнозирования воздействия лесного пожара на окружающую среду, скорости и направления распространения и воздействия на различные объекты инфраструктуры вблизи границы между дикой местностью и городом (WUI) [57].

Целью работы в предложенной статье [57] является обзор последних и значительных исследовательских работ по физико-химическим процессам в деревянных строительных материалах во время пожаров WUI.

В результате анализа литературных источников, работ, посвященных моделированию и экспериментальным выделены исследования различных физико-химических процессов, а именно воздействия лесных пожаров на жилые и промышленные

объекты, тепло- и массообмена в конструкционных материалах, процессов сушки, пиролиза и воспламенения конструкционных материалов [57].

Основной вывод состоит в том, что существующие экспериментальные и теоретические работы могут быть интегрированы в разработанный детерминистско-вероятностный подход к прогнозированию воздействия лесного пожара на здания [57].

1.7 Воздействие лесных пожаров на населенные пункты и промышленные объекты

Пожар в сельской или городской местности – это событие, которое влечет за собой высокие последствия, связанные с поэтапным возникновением пожаров в жилых домах, особенно в сельской местности, где дома расположены на близком расстоянии друг от друга [58].

На примере исследования [59], рассмотрим леса Амазонки. Лесные пожары и вырубка лесов являются основными угрозами для лесов Амазонки. Экстремальные явления засухи усугубляют последствия лесных пожаров в бассейне Амазонки, и, по прогнозам, эти явления засухи станут более частыми из-за изменения климата. Огонь проникает в лес с сельскохозяйственных угодий и пастбищ. Была проведена оценка потенциальных причин обезлесения и лесных пожаров в центральной части бразильской Амазонки и показали, что за 31 год (1985-2015) лесные пожары происходили только в годы сильной засухи, вызванной Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015 годы). На рисунке 1.16 вырубка лесов и шрамы от лесных ожогов в муниципалитете Аутазес [59].

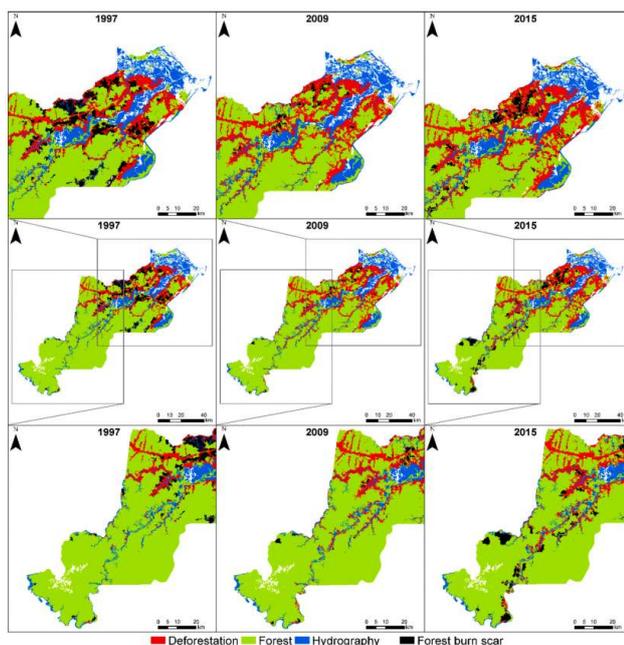


Рисунок 1.16 – Вырубка лесов и шрамы от лесных ожогов в муниципалитете Аутазес в 1997, 2009 и 2015 годах [59]

Обезлесенные районы были тесно связаны с судоходными реками: 62% от общего объема вырубki лесов с 2000 по 2018 год приходилось на 2 км рек. В течение 2015 года наблюдался заметный рост вырубki лесов и лесных пожаров. Лишь небольшая часть сгоревшего леса была вырублена в годы, последовавшие за лесными пожарами: 7% (1997), 3% (2009) и 1,5% (2015 год). Из общей площади населенных пунктов 40% пострадали от лесных пожаров и 17% было вырублено. Реки особенно важны для обезлесения в этой части Амазонии, и поэтому необходимы усилия по защите лесов вдоль рек. Способность предсказывать, где происходит вырубka лесов и пожары наиболее вероятное возникновение важно для разработки политики превентивных действий [59].

Республика Саха (Якутия), которая составляет северо-восточную часть Сибири, занимает самую большую площадь лесного покрова среди всех субъектов Российской Федерации, и лесные пожары на ее территории оказывают значительное воздействие на глобальную окружающую среду [60].

В [60] предложен местный взгляд на глобально важную проблему сибирских лесных пожаров, обсудить общие закономерности и тенденции лесных пожаров в Якутии, систему государственного управления ими и их местные последствия. Данные государственной статистики свидетельствуют о снижении частоты пожаров, но очевидном увеличении выжженной площади в последние десятилетия в Якутии - например, с периода 1985-1994 годов по период 2005-2014 годов среднее количество пожаров сократилось на 17%, в то время как их средняя площадь увеличилась на 73%. Эти факторы также, вероятно, будут важным фактором, определяющим будущие тенденции лесных пожаров в Сибири в сочетании с последствиями глобального изменения климата [60]. На рисунке 1.17 представлено производство товарной древесины в муниципальных районах Якутии [60].

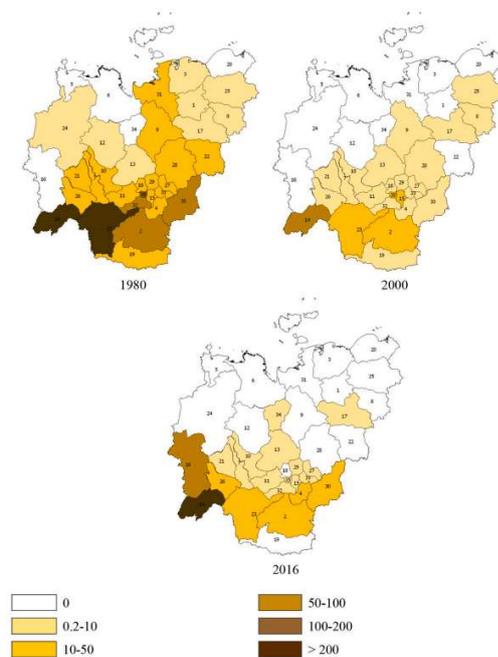


Рисунок 1.17 – Производство товарной древесины в муниципальных районах Якутии, тыс. твердых кубических метров [60]

В статье [61] представлена оценка воздействия крупномасштабных лесных пожаров (ЧС) на населенные пункты и территорию Российской Федерации. Проведена оценка достаточности проводимых мероприятий по обеспечению пожарной безопасности населения и территорий населенных пунктов, которая основана на анализе последствий таких пожаров.

Были использованы методы, основанные на основных положениях теории систем, системного анализа и информатики: анализ, синтез, обобщение и математическая статистика. Результаты статьи предлагается использовать при планировании мероприятий по населению и территориям населенных пунктов защита от крупномасштабных лесных пожаров. В таблице 1.5 представлена классификация чрезвычайных ситуаций в лесах [61].
Таблица 1.5 – Классификация чрезвычайных ситуаций в лесах [61]

Наименование ЧС	Характеристика зоны ЧС в лесах
Чрезвычайная ситуация в лесах муниципального характера	Не выходит за пределы одного муниципального образования, при этом в лесах на указанной территории не локализованы крупные ЛП или ЛП действует более 2 сут.
Чрезвычайная ситуация в лесах регионального характера	Не выходит за пределы территории субъекта РФ, введён режим ЧС в лесах муниципального характера на территории двух и более муниципальных районов, при этом значения двух и более показателей, определяемых на конкретную календарную дату в течение периода пожарной опасности, для данного субъекта РФ на 50 % или более превышают их средние значения за предыдущие 10 лет на эту же календарную дату: количество ЛП в расчете на 1 млн га площади земель лесного фонда; доля крупных ЛП в общем количестве возникших ЛП; средняя площадь пожара; доля площади, пройденной ЛП, в общей площади земель лесного фонда
Чрезвычайная ситуация в лесах межрегионального характера	Затрагивает территории двух и более субъектов РФ, при этом на территории каждого из них введён режим ЧС в лесах регионального характера
Чрезвычайная ситуация в лесах федерального характера	Затрагивает территории двух и более федеральных округов, при этом на территории каждого из них введен режим ЧС в лесах межрегионального характера

По результатам исследований были сделаны следующие выводы: необходимо провести ряд мероприятий по управлению пожаротушением населенных пунктов (например, для создания барьеров и опорных полос вокруг населенных пунктов); и наладить сотрудничество между организациями, которые занимаются прогнозированием возможных ситуаций с лесными пожарами, и силами, которые могут быть задействованы в защите населенных пунктов от последствий лесных пожаров [61].

В статье [62] автор описывает современную организацию и методы тушения лесных пожаров и пожаров в сельских населенных пунктах, а также меры по предотвращению лесных пожаров и их воздействия на сельские населенные пункты, и рассматривается необходимость совершенствования организации тушения пожаров.

Мероприятия по тушению пожаров в лесах лесхозов возложены на государственную лесную охрану, а действия их работников начинаются с момента получения сообщения о пожаре и считаются законченными после возвращения сил и средств пожаротушения на места их дислокации [62]. На рисунке 1.18 представлен алгоритм организации тушения лесных пожаров лесопожарными организациями

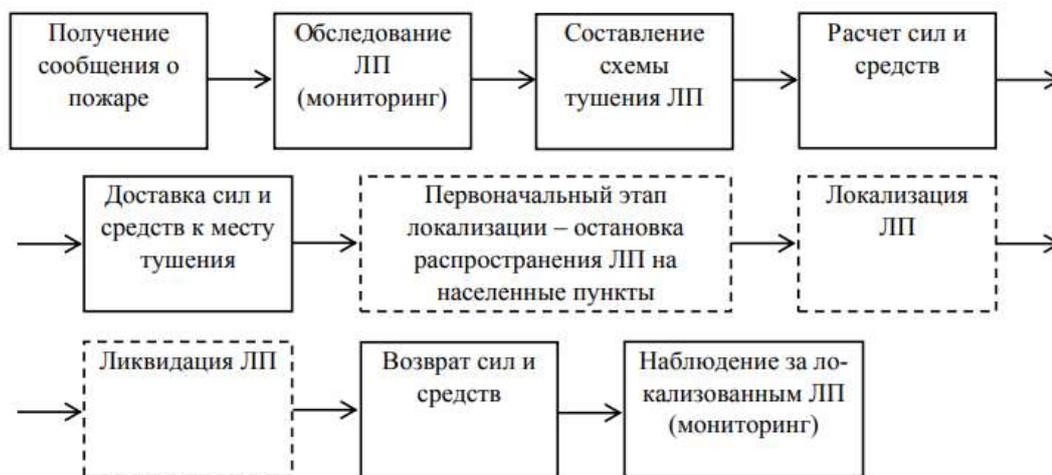


Рисунок 1.18 – Алгоритм организации тушения лесных пожаров лесопожарными организациями [62]

1.8 Технологии ГИС в прогнозе лесных пожаров и их последствий

Лесные пожары представляют серьезную экологическую опасность в лесной экосистеме, которую можно изучать с помощью дистанционное зондирования и географических интегрированных систем (ГИС).

Компьютерное моделирование – исследование в области прогнозирования лесных пожаров, занимает важную роль и является перспективным направлением [63]. Для

мониторинга, а также для выявления очагов возгорания используется технология ГИС. Принцип работы основан на сохранении и эффективном извлечении пространственной информации.

В [64] используются данные дистанционного зондирования Landsat – 8 OLI (2020) и ASTER DEM для создания карт растительного покрова и параметров топографии, таких как аспект, высота и уклон. На рисунке 1.19 представлены тематические карты факторов риска лесных пожаров [64].

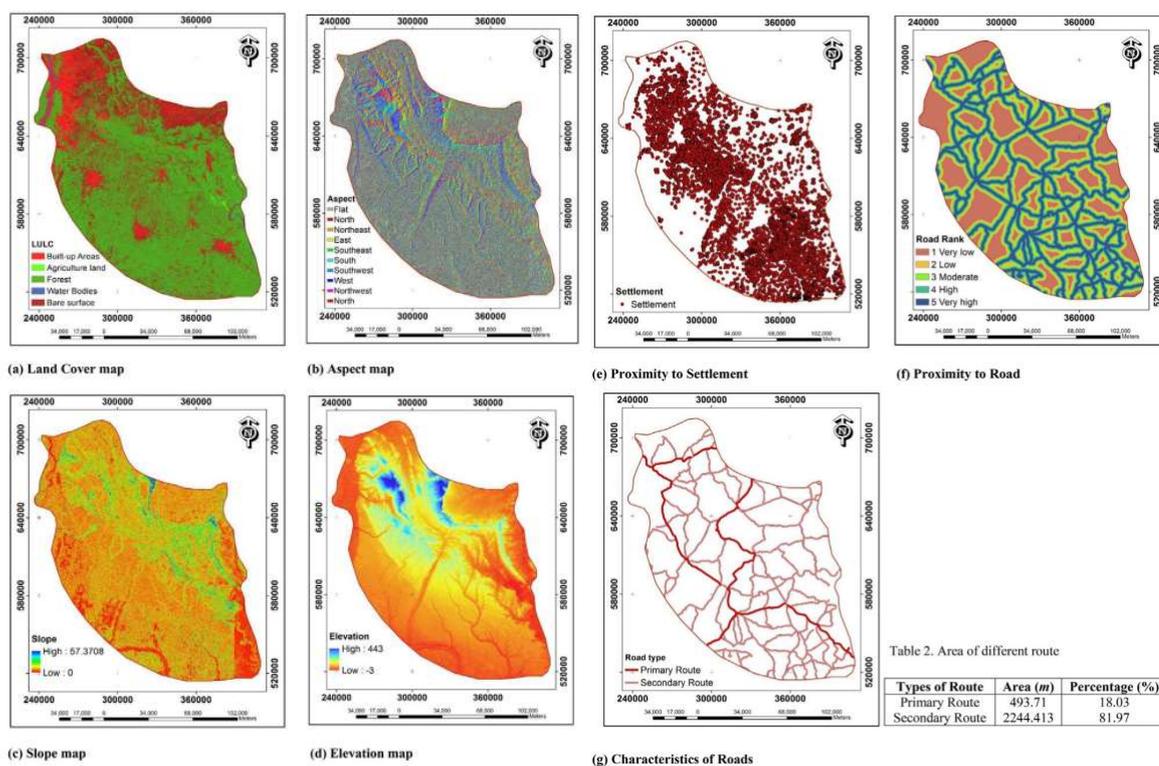


Рисунок 1.19 – Тематические карты факторов риска лесных пожаров [64]

Окончательная карта зоны риска лесных пожаров (FFRZ) была подготовлена путем интеграции различных параметров, таких как растительный покров, аспект, высота, уклон, близость к дорогам и расположение в среде ArcGIS [64].

Зона FFRZ была разделена на три категории как зоны низкого, умеренного и высокого риска в зависимости от их пожароопасности [64].

Исследование показывает, что дистанционное зондирование и ГИС являются отличными инструментами для моделирования зон риска лесных пожаров, тем самым доказывая, что пожары имеют антропогенное происхождение [64].

При эффективном прогнозировании показателей, а также своевременной оценке опасности и возможности воспламенения лесных пожаров применяется мониторинг и своевременное тушение пожаров. ГИС-технологии, дистанционное и компьютерное зондирование способствует разработке компьютерных решений для моделирования [65].

В [66] был предложен комплексный подход к созданию карты риска лесных пожаров. В нем использовался основанный на географической информационной системе многокритериальный анализ решений (GIS–MCDA) с процессом аналитической иерархии (АНП) и статистическим индексом (SI). Исследование проводилось в Региональном управлении лесного хозяйства Мерсина (RDF) в регионе Восточного Средиземноморья Турции.

На рисунке 1.20 представлена область исследования [66].

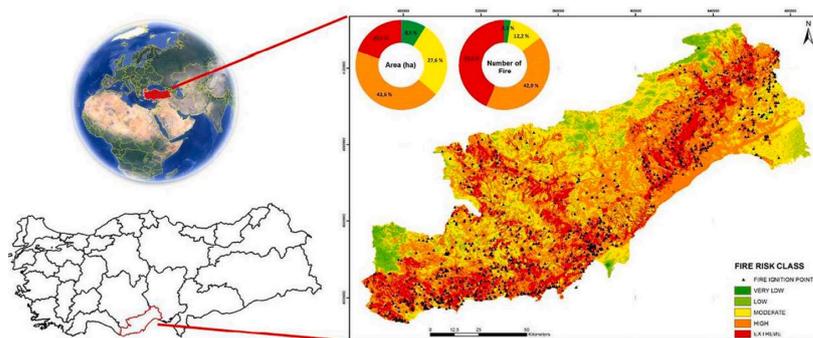


Рисунок 1.20 – Область исследования [66]

Полученные результаты показывают, что исследуемый район сильно подвержен лесным пожарам. Кривая относительной рабочей характеристики и площадь под кривой использовались для проверки точность карты пожарной опасности. Эта проверка показала очень высокую точность 0,775 для модели АНР, что указывает на высокую точность картирования риска лесных пожаров, а полученная карта была последовательной и надежной [66].

На рисунке 1.21 представлены карты критериев структуры леса: видовой состав (а), закрытие кроны (б), стадия развития (в) [66].

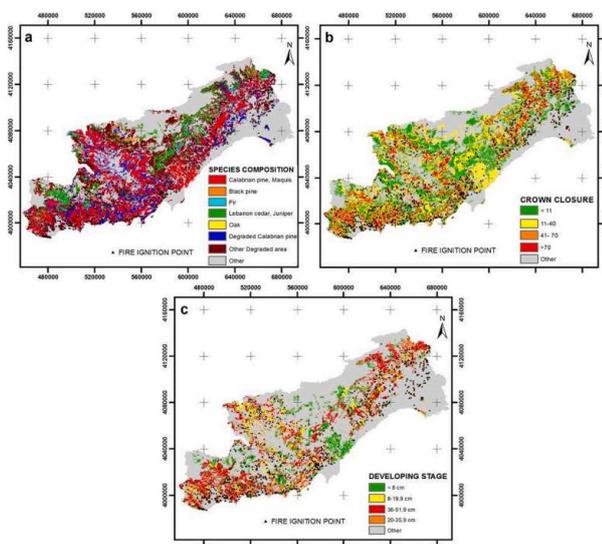


Рисунок 1.21 – Карты критериев структуры леса [66]

На борту искусственных спутников земли с помощью сенсоров функционирует дистанционное зондирование [67].

При распространении лесных пожаров можно выделить следующие задачи моделирования:

- прогноз распространения лесных пожаров на территории;
- ручная установка начальной площади возгорания при помощи модели в соответствии с изображениями поля пожара, полученными с авиации и спутников;
- оказание поддержки пожарным подразделениям в создании зон изоляции лесных пожаров;
- расчёт пути эвакуации людей во время пожара;
- уменьшение затрат, сил и средств на тушение;
- экологический прогноз после пожаров.

Расстояние от пламени до ближайшего места, время тушения, а также средства пожаротушения, эвакуационные пункты, возможные силы и средства привлечения – всё это позволяет определить использование стандартных инструментов [68].

Создание карты пожарной опасности состоит из трех этапов технологии:

1. Предварительная обработка.
2. Программные расчеты.
3. Полученные результаты обрабатываются с помощью ГИС. Данные выводятся в различных формах, таких как карты, таблицы, изображения, блок-схемы.

Оперативные данные по ГИС изменяются с частотой одного или нескольких раз в день. За счет применения ГИС, увеличилась оперативность реакции при возгорании лесные пожары.

В последние годы растительный покров в городских агломерациях очень быстро меняется из-за техногенного воздействия. Спутниковые снимки играют огромную роль в изучении динамики лесной растительности. Для обработки спутниковых снимков используются специальные программы.

В этом исследовании [69] авторы представляют алгоритм, реализованный на Python, для количественной оценки изменения площади растительности в городской агломерации с использованием мультиспектральных данных Landsat. Инструмент позволяет считывать космические снимки, вычислять спектральные индексы (NDVI, UI, NDWI) и выполнять статистическую обработку результатов интерпретации. Созданный инструмент был применен для изучения динамики растительность в пределах Томской городской агломерации в период 1990-2022 годов. Основные выводы, сделанные в работе: площадь

нелесных территорий увеличилась с 1990 по 1999 год и с 2013 по 2022 год. Авторы предположили, что это связано с ухудшением уровня жизни в стране в эти периоды.

1.9 Распространение лесных пожаров

На сегодняшний день методы математического моделирования широко используются в исследовании процессов чрезвычайных ситуаций. Пожары в лесной местности несут разрушения природному ландшафту, флоре и фауне, а также имеют прямую зависимость от метеорологических условий и наличия топлива.

В статье [70] были рассмотрены вопросы, связанные с распространением огня в лесной зоне при наличии ветра, а также термическое воздействие на деревянное строение. На рисунке 1.21 представлен характер распространения лесных пожаров.

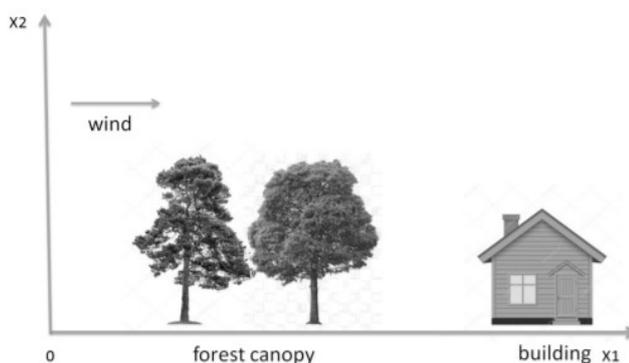


Рисунок 1.22 – Характер распространения лесных пожаров [70]

На рисунке 1.23 представлено распределение температуры на стене деревянной конструкции (20×50×20 метров) для разных скоростей ветра (3-15 м/с) и для разных расстояний l (10-50м) [70].

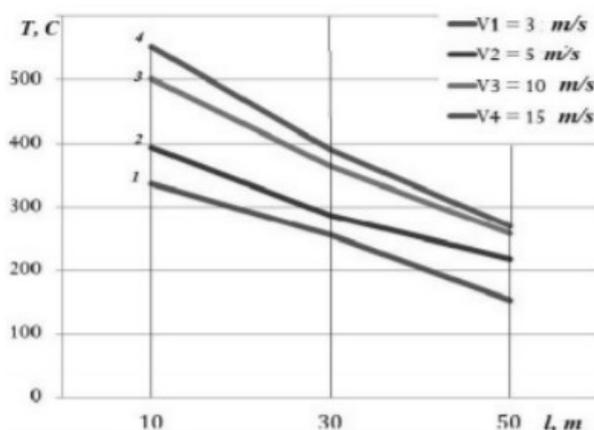


Рисунок 1.23 – Распределение температуры на стене деревянной конструкции 20×50×20 [70]

Анализ этой зависимости показывает:

1) деревянная конструкция со скоростью ветра 3 м/с загорается на расстоянии 15-16 метров от лесных пожаров;

2) при $v = 5$ м/с — $l \approx 26-27$ метров; 3) $v = 10$ м/с — $l \approx 39-40$ метров; 4) $v = 15$ м/с — $l \approx 46-47$ метров.

На рисунке 1.24 представлено распределение температуры на стене деревянной конструкции (12×15×12 метров) для разных скоростей ветра (3-15 м/с) и для разных расстояний l (10-50 м).

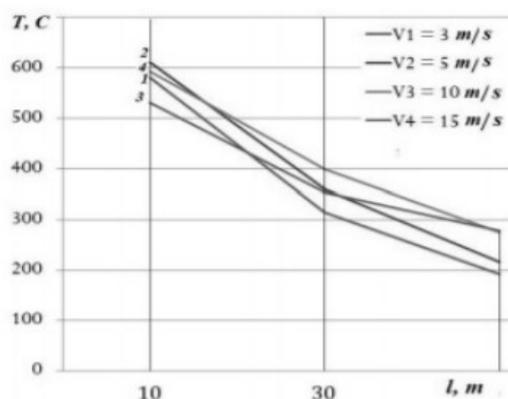


Рисунок 1.24 – Распределение температуры на стене деревянной конструкции 12×15×12 [70]

Анализ этих отношений (рис. 22) показывает следующее: 1) деревянное строение со скоростью ветра 3 м/с, загорается на расстоянии 32-33 метров от лесных пожаров; 2) с $v = 5$ м/с — $l \approx 38-39$ метров от лесных пожаров; 3) с $v = 10$ м/с — $l \approx 43-44$ метров от лесных пожаров; 4) с $v = 15$ м/с — $l \approx 42-43$ метров.

В другой статье [71] было рассмотрено влияние пожаров лесной местности на населенные пункты на основе математического моделирования с целью изучения безопасного расстояния от зданий до лесного массива.

На рисунке 1.25 схематично изображено движение фронта огня, который движется в сторону населенного пункта с помощью ветра [71].

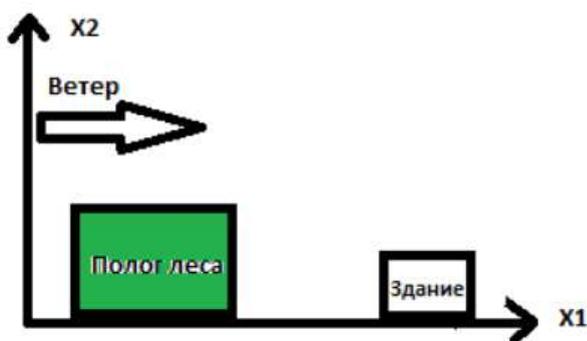


Рисунок 1.25 – Движение фронта лесного пожара [71]

На рисунке 1.26 отражено вероятное возгорание здания с учётом движения ветра и его скорости. При условии увеличения скорости ветра увеличиваются размеры зоны зажигания.

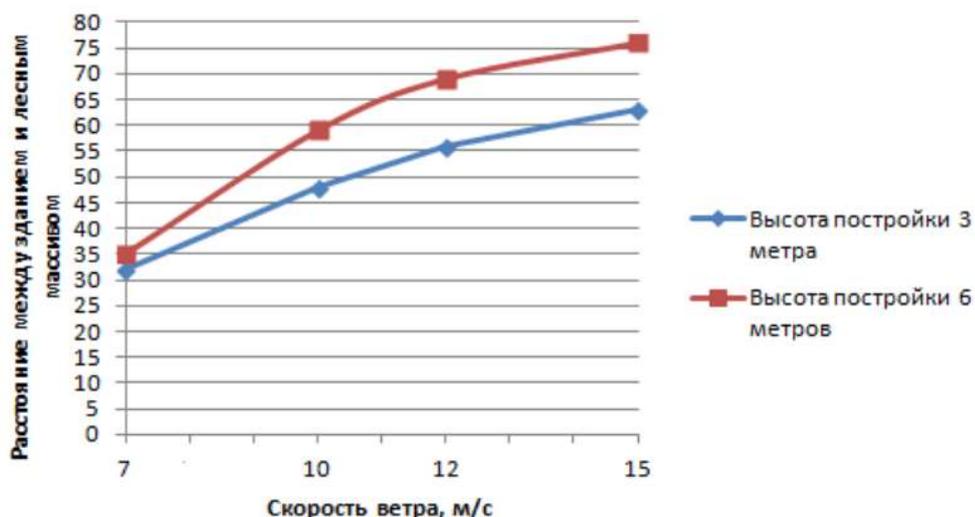


Рисунок 1.26 – Зависимость расстояний, при которых произойдет возгорание, при различных скоростях ветра при высоте строения в 3 и 6 метров [71]

В исследовании [72] было изучено распространение фронта верхового пожара лесного массива на основе математического моделирования.

Из рисунков 1.27 можно увидеть, во время действия низового пламени огня в лесном массиве происходит воспламенение полога леса. Горящая область движется вдоль движения ветра. На графиках заметно, что с течением времени зона горения движется как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении [72].

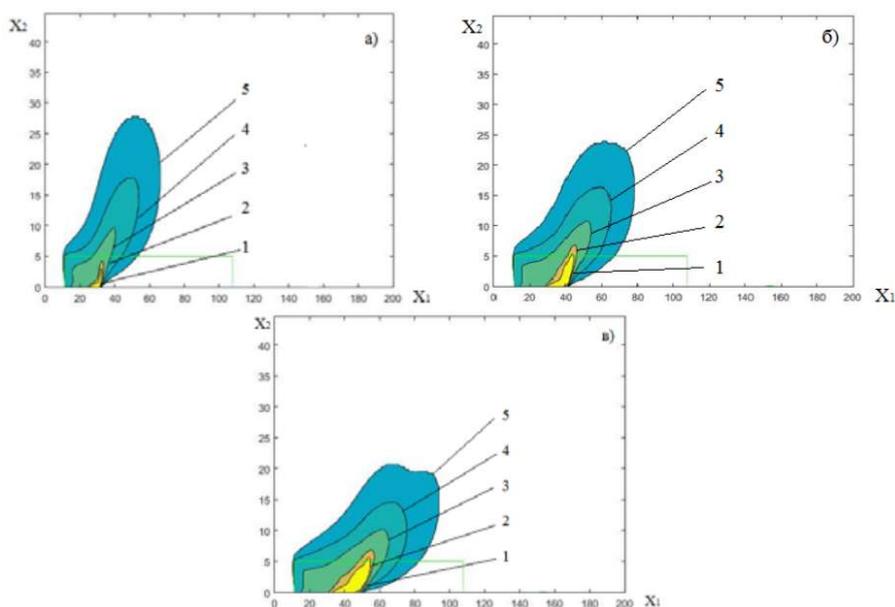


Рисунок 1.27 – Распространение верхового лесного пожара при скоростях 5, 7, 10 м/с в момент времени 15 с [72]

В другой работе [73] физической моделью была одноквартирная деревянная постройка, которая находится недалеко от леса, охваченного огнем. На рисунке 1.28 представлена геометрия области решения.

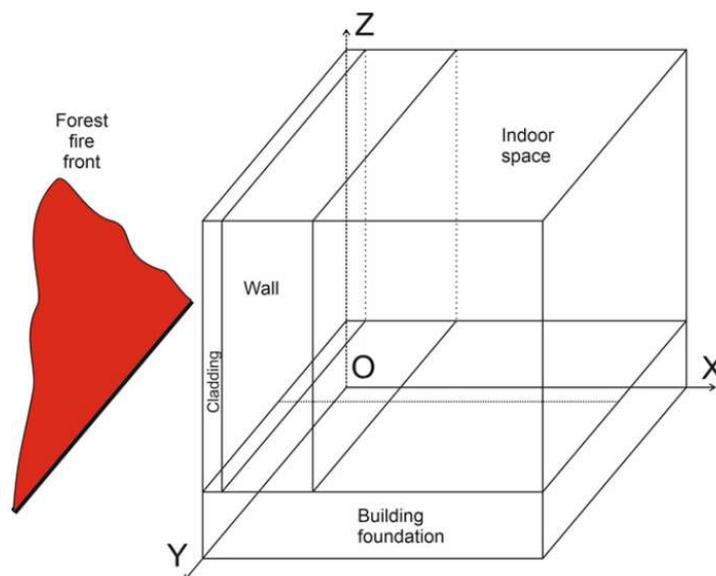


Рисунок 1.28 – Геометрия области решения [73]

На рисунке 1.29 представлены результаты математического моделирования под действием низового лесного пожара (высокой интенсивности) фронт начинает движение на расстоянии 20 метров от ограждающей конструкции деревянного дома [73].

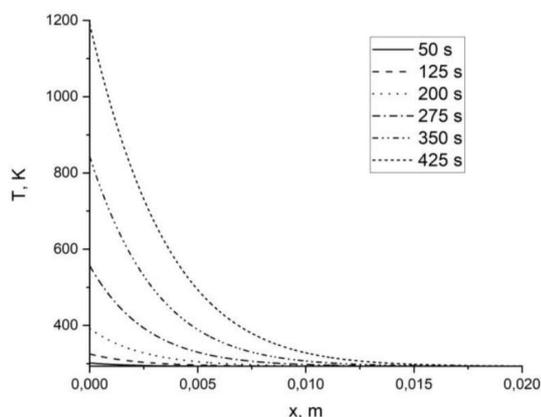


Рисунок 1.29 – Результаты математического моделирования [73]

1.10 Инфраструктура железной дороги

Использование железнодорожного транспорта по-прежнему популярно во всем мире. Однако из-за высокой концентрации потоков людей, злоумышленники также нацелены на железные дороги. Это касается мест, к которым люди имеют быстрый доступ, что делает невозможным их полную защиту. Железные дороги представляют собой основную цель, при защите которой ключевым аспектом является безопасность людей,

тогда как в случае ключевых элементов инфраструктуры целью также является сохранение их функционирования.

В предложенной работе [74] было проведено исследование развития экономики и транспортной инфраструктуры арктических и северных территорий России.

Предлагается новый тип железных дорог – легкая железная дорога. Предлагаемый новый вид транспорта позволяет использовать основные преимущества узкоколейных железных дорог (скорость строительства, эффективность и т.д.) и ликвидировать их основной недостаток – необходимость перегрузки при переходе с узкой колеи на обычную, шириной 1520 мм, при значительном сокращении капитальных затрат [74].

В случае непредвиденных и разрушительных событий, не только на трассе или на железнодорожной станции, но и в прилегающих к ним районах важно, чтобы о них узнали не только пассажиры, но и другие перевозчики и другие организации как можно быстрее. Однако по данным исследованиям [75] на сегодняшний день в Чешской Республике не существует единой процедуры обмена и предоставления информации при железнодорожных перевозках.

Железнодорожная инфраструктура состоит из железнодорожных линий, включая их приспособления, обеспечивающие их функциональность и безопасность, а также железнодорожных зданий. Все крупные узлы железнодорожного транспорта могут рассматриваться как подверженные риску, например, главный железнодорожный вокзал в Праге (где ЖД станция также включает в себя станции метро, и магазины с большим скоплением людей) [75].

Помимо расположения и характера железнодорожной станции и взаимосвязи с другими элементами и объектами, элементам железнодорожной инфраструктуры также могут угрожать политические, экономические, социальные, технологические, законодательные или экологические угрозы. В Чешской Республике не существует процедуры обмена информацией среди других перевозчиков, интегрированных транспортных и других организаций [75].

В предложенной статье [76] описываются основные задачи при строительстве и обслуживании железнодорожных коридоров в вечномёрзлых грунтах, связанные с криогенными процессами, происходящими в северных широтах. На рисунке 1.30 представлены железнодорожный мост и железнодорожная дорога в условиях вечной мерзлоты [76].



Рисунок 1.30 – Самый северный железнодорожный мост (слева) и самая северная железная дорога (справа) построены в условиях вечной мерзлоты [76]

Результаты моделирования подтверждают, что необходимо следовать принципу поддержания мерзлого состояния грунта в основании железнодорожной насыпи в северных зонах. Было установлено, что для проектирования и строительства земляного полотна в северных зонах следует использовать скалистый грунт, поскольку его физические свойства практически не меняются при замерзании и оттаивании. В умеренных и южных зонах рекомендуется оттаивание вечномёрзлого грунта с последующим обезвоживанием несущего грунта. Также требуется удалить талый грунт с оснований насыпей [76].

Процесс создания проектов и отчетности известен как BIM (Информационное моделирование зданий). Это определяется как современная тенденция в области строительной индустрии и архитектуры. BIM начал внедряться в конструкции железнодорожной инфраструктуры в основном в высокоразвитых странах, таких как Великобритания, Франция или Швеция, примерно с 2013 года. Однако в Словацкой Республике этот процесс не так хорошо известен большинству людей, работающих в этой области [77].

Целью предложенной статьи [77] является анализ знаний о BIM и его использовании в Словацкой Республике. В качестве метода исследования использовалась анкета, распространяемая среди специалистов, работающих в компаниях государственной службы, в области проектирования и строительства железнодорожной инфраструктуры. Результаты анкетирования показывают, что только 29% респондентов смогли правильно ответить на вопрос, что такое BIM.

В рамках вводных этапов исследовательского проекта, посвященного многомерной модели жизненного цикла железной дороги, создается примерная модель железной дороги 5D BIM [77].

Транспортная отрасль в современный период сталкивается с проблемами цифровизации, модернизации инфраструктуры и интенсификации использования

существующих линий. Для осуществления перевозочного процесса железные дороги России оснащены различными техническими устройствами и средствами, к которым относятся различные устройства железнодорожной автоматизации. Одновременно с разработкой новых систем управления происходит внедрение новых технологий оперативной работы.

В статье [78] рассматривается целесообразность и эффективность использования мобильных блок-секций и виртуальных сцепок в условиях ограниченной пропускной способности железнодорожных направлений, позволяющих оптимизировать интервальное регулирование движения поездов, сократить интервалы слива, снизить энергопотребление на тягу, а также затраты на содержание инфраструктуры. Раскрываются экономические и технологические аспекты внедрения этих инноваций [78]. На рисунке 1.31 представлены системы внутреннего регулирования движения поездов.

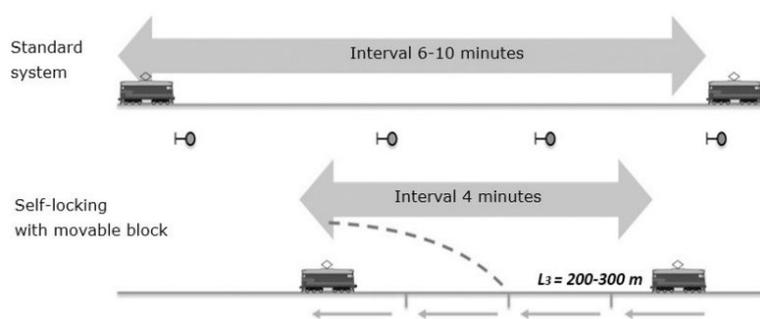


Рисунок 1.31 – Системы внутреннего регулирования движения поездов [78]

В другой статье [79] основной целью является анализ транспортных потоков, определение требований к транспортно-логистической инфраструктуре, а также предложить интегрированную транспортно-логистическую модель для Арктической зоны России. Арктическая зона России обладает значительным многофакторным потенциалом. Необходимо максимально использовать этот потенциал, учитывая все особенности этого региона. Важным фактором является развитие транспортно-логистической инфраструктуры в регионе. Целесообразно построить интегрированную транспортно-логистическую модель, объединяющую все виды и области использования используемого транспорта [79].

Увеличение числа экстремальных погодных явлений, связанных с глобальным потеплением, создало глобальную проблему для инфраструктуры.

В [80] анализируются исторические данные о стихийных бедствиях, вызванных осадками, Китайские железные дороги с 1981 по 2016 год, риск стихийных бедствий, вызванных осадками в железнодорожной инфраструктуре, возрастает с увеличением числа дней с экстремальными осадками. На рисунке 1.32 представлено обрушение земляного

полотна, вызванное сильными осадками вдоль железной дороги Лунхай в 2010 году и оползень, вызванный сильными осадками вдоль железной дороги Нейкун в 2013 году [76].



Рисунок 1.32 – Обрушение земляного полотна (а) и оползень (б) [76]

После глобального потепления на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в соответствии с RCP8.5 доля железнодорожной инфраструктуры, подверженной высокому риску стихийных бедствий возрастет на $\sim 2.8/4.0/6.7$ - раза по сравнению с базовым периодом (1981-1998 годы). Ограничение глобального потепления до $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволит сэкономить экономические потери примерно на 0,63 и 2,06 миллиарда долларов США в год по сравнению с потеплением на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Это исследование подразумевает необходимость и выгоду ограничения глобального потепления до Парижского соглашения - $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в контексте инфраструктуры [80].

Города по всему миру активизируют усилия по изменению своей инфраструктуры, чтобы обеспечить углеродно-нейтральное и устойчивое будущее, что приведет к быстрой электрификации транспортных систем. Спрос на электроэнергию в этом секторе, особенно на высокоскоростных железных дорогах, растет. Применение существующей инфраструктуры железнодорожных станций и имеющихся земельных участков вдоль железнодорожных линий для производства фотоэлектрической (фотоэлектрической) электроэнергии потенциально может обеспечить высокоскоростные поезда возобновляемой энергией и поставлять излишки электроэнергии окружающим пользователям [81].

В работе [81], для оценки фотоэлектрического потенциала вдоль железнодорожных линий и на крышах железнодорожных станций была разработана методология, основанная на географической информационной системе. В качестве примера была использована высокоскоростная железная дорога Пекин-Шанхай (ВСМ). Его общий фотоэлектрический потенциал достиг 5,65 ГВт (из которых потенциал станции составлял 264 МВт, приблизительно 4,68% от общего потенциала), с пожизненной генерирующей мощностью 155 ТВтч, что соответствует приблизительно 12% от общей новой установленной мощности Китая в 2020 году [81]. На рисунке 1.33 представлена система PV+HSR [81].



Рисунок 1.33 – Концепция интеграции фотоэлектрических и железнодорожных транспортных систем [82]

Для прогнозирования и оценки опасности от лесных верховых пожаров необходимо изучить термическую деградацию различных видов лесного топлива в условиях высокой температуры окружающей среды. В статье [82] представлены основные характеристики пиролиза, сопровождающегося испарением влаги в образце листвы из покрытосеменного растения (береза), были исследованы в условиях типичных для лесного верхового пожара.

На рисунке 1.34 представлена схема пассажирской перевозки.

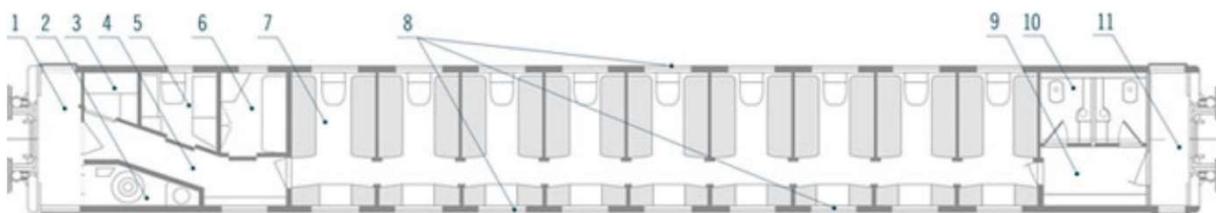


Рисунок 1.34 – Схема пассажирской перевозки [82]

Объектом исследования в предложенной статье [82] является пассажирский вагон, типичный для подвижного состава Российских железных дорог. На рисунке 1.34 показан план пассажирской перевозки российских железных дорог. На рисунке 32 цифры обозначают: 1 – закрытая платформа; 2 – котельное отделение; 3 – боевое помещение; 4 – проход; 5 – купе для персонала; 6 – купе для проводников; 7 – купе; 8 – окно; 9 – проход; 10 – туалет; 11 – вторая закрытая платформа.

Предметом исследования является теплообмен в конструкциях пассажирского вагона за счет воздействия лучистого теплового потока от фронта лесного пожара.

В данной работе проводится сценарное моделирование воздействия лесных пожаров на конструкцию пассажирского вагона.

Сценарий 1: воздействие поверхностного лесного пожара низкой интенсивности с учетом метеорологических условий, типичных для летней лесной пожарной опасности.

На рисунках 1.35 показаны температурные поля в ограждающей конструкции пассажирского вагона для сценария воздействия низового лесного пожара низкой интенсивности.

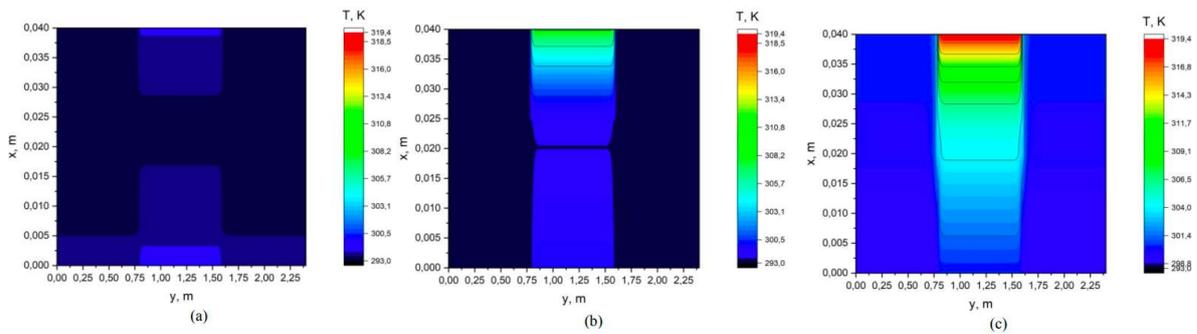


Рисунок 1.35 – Температурные поля для сценария воздействия низового лесного пожара низкой интенсивности: (а) 125 с; (б) 300 с; (в) 425 с [82]

Сценарий 2: воздействие низового лесного пожара высокой интенсивности с учетом метеорологических условий, характерных для летнего периода лесной пожарной опасности. На рисунках 1.36 показаны температурные поля в ограждающей конструкции пассажирского вагона для сценария воздействия высокоинтенсивного поверхностного лесного пожара.

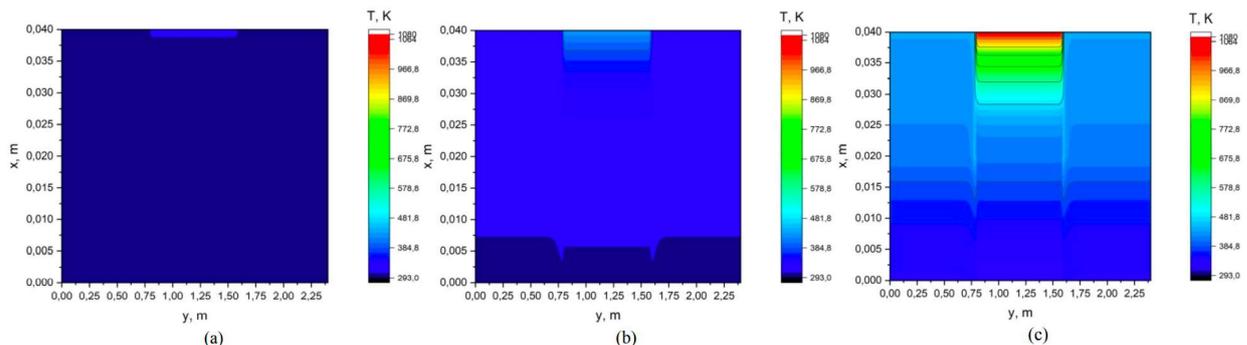


Рисунок 1.36 – Температурные поля для сценария воздействия высокоинтенсивного низового лесного пожара: (а) 125 с; (б) 300 с; (в) 425 с [82]

Сценарий 3: воздействие лесного верхового пожара с учетом метеорологических условий, типичных для летней лесной пожарной опасности. На рисунке 1.37 показано температурное поле в ограждающей конструкции пассажирские перевозки для сценария воздействия лесного верхового пожара [82].

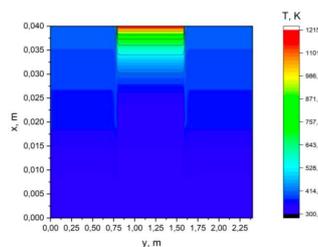


Рисунок 1.37 – Температурное поле в ограждающей конструкции пассажирского вагона для сценария воздействия пожара в кронах деревьев при времени воздействия 75 секунд [82]

1.11 Конструкционные материалы

По структуре стекла представляют собой переохлажденные системы. Катионы и анионы вещества стекла расположены друг относительно друга как в жидкости, т. е. с соблюдением лишь ближнего порядка. В то же время тип движения ионов в стеклах — в основном колебания — характерен для твердого состояния. В отличие от веществ, находящихся в кристаллическом состоянии, стекла не имеют четких температур плавления и затвердевания. При нагревании стекло размягчается, постепенно переходя в жидкое состояние. При охлаждении расплавленного стекла затвердевание тоже происходит постепенно. При нагревании стекло размягчается и, как известно, приобретает способность течь, образуя наплывы.

В работе [83] утверждается, что основным технологическим процессом при производстве стекла является его варка. Варка листового стекла выполняется в непрерывно действующих печах, оно основывается на непрерывности процесса, который позволяет установить стабильный температурный режим стекломассы, что должно постоянно обеспечиваться без отклонений, потому что ванна печи чрезвычайно чувствительна к различным отклонениям от установленного режима. В производстве листового стекла основным фактором, определяющим скорость варки, является температура. Процесс варки стекла сопровождается значительными энергозатратами, которые можно снизить за счет использования автоматизированного управления. Для обеспечения надлежащего качества стекла и уменьшения количества брака, варку нужно вести строго по установленному температурному режиму. Основной задачей системы автоматического управления тепловым режимом печи является выдержка заданной кривой изменения температуры стекломассы.

В исследовании [84] была представлена модель расчета температурного поля в кварцевом стержне с учетом испарения материала при воздействии мощных миллисекундных импульсов CO₂-лазера.

1.12 Выводы по результатам аналитического обзора литературы

Проведя анализ обзора аналитической литературы, можно сделать несколько выводов:

1) Каждый год в весенний и летний период наша страна борется с огромной бедой — большие площади охватывают пожары. Лесные пожары достигают инфраструктурные объекты железных дорог, что приводит к таким последствиям как: гибель людей; причинение вреда здоровью; уничтожение жилья; ухудшение качества питьевой воды; загрязнение атмосферы; потери плодородности почвы; гибель животных.

2) В нашей стране лесные пожары классифицируют по разным признакам: по количеству охватываемой территории, по уровням сложности и по способу распространения пламени.

3) Процесс сушки является важным этапом в решении проблемы лесных пожаров. Воспламенение ЛГМ напрямую зависит от влагосодержания. Данную взаимосвязь можно использовать для оценивания пожарной опасности.

4) За последние 10 лет было создано большое количество математических моделей лесных пожаров. Математическое моделирование – перспективное направление в области прогнозирования лесных пожаров, которое не требует затрат проведения мероприятия в отличие от экспериментальных исследований. Большая часть исследований базируется на послепожарном периоде.

5) В последнее время для прогнозирования пожаров используется большое количество научных разработок. К примеру, ГИС-технологии, которые оказались успешными в применении.

6) Пожары несут за собой огромный ущерб не только для экономики, но и для экосистемы. Происходит разрушение экосистемы и уменьшение разнообразия видов растений.

2 Методы исследования

2.1 Объект исследования

Объектом исследования является инфраструктурный объект железной дороги, он представлен на рисунке 2.1 [88]. Стена инфраструктурного объекта железной дороги представляет собой двухслойную модель – древесину и внешнее покрытие, также присутствует стеклянное окно. Предметом исследования можно обозначить теплоперенос в двухслойной структуре деревянного строения под воздействием теплового потока от фронта различных видов пожаров.



Рисунок 2.1 – Объект исследования

Ежегодно от лесных пожаров страдает большое количество как отдельных жилых зданий, так и целых населенных пунктов, особенно в местах, где здания интегрированы в лес [89]. Для этих регионов существенной опасностью является риск лесного пожара, который может быть вызван как природными, так и техногенными факторами [90].

Классификация лесной земли [90]:

1. Районы дикой природы, недоступные для человека; риск возникновения пожара по техногенным причинам минимален. Мониторинг состояния лесных насаждений может быть применен в целях борьбы с лесными пожарами. Такие меры могут помочь управлять лесными пожароопасными ситуациями и снизить частоту появления пожаров в будущем.

2. Основные направления лесопользования, включая более доступные участки леса, а также участки с товарной древесиной.

3. Жилые районы – участки, где границы домов соприкасаются с границами леса. Как правило, контроль за лесными насаждениями направлен на защиту мест массовых поселений и инфраструктуры.

Вторую и третью зоны можно далее условно разделить на три группы снижения риска [91]:

- Отдельные квартиры и прилегающая территория.
- Границы между населенными пунктами и дикой растительностью.
- Дикая растительность между населенными пунктами.

2.2 Метод конечных разностей

Задачи многомерного типа принято решать, основываясь на локальной одномерной схеме А.А. Самарского. В предложенном методе шаг по времени реализуется в несколько этапов. На промежуточном шаге по времени многомерное уравнение теплопередачи дискретизируется в направлении одной из осей. После этого получаем одномерное уравнение. После решения одномерного уравнения проводится дискретизация данного уравнения по направлению другой оси и одномерное уравнение решается повторно. Количество этапов зависит от координат, которые рассматриваются в данной задаче. К примеру, двумерная задача решается в два этапа. Решив уравнения по направлениям осей, на целом временном шаге определяется поле температур [93].

Математическое моделирование в данной системе производится на основе метода конечных разностей (МКР).

Нестационарный перенос тепла можно описать уравнением Фурье-Кирхгофа:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T).$$

Для решения задачи необходимо задать физические, геометрические и начальные и граничные условия. Геометрические условия – размеры тела и его форма. Физические условия – теплоемкость, теплопроводность и плотность. Начальные условия – распределение температуры в начальный момент времени. Граничные условия – особенности протекания процесса на поверхности тела.

В данной работе уравнение задается в прямоугольной системе координат и тогда уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T).$$

Построим конечно-разностную сетку, она представлена на рисунке 2.2.

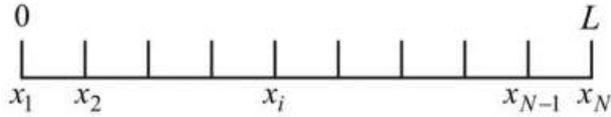


Рисунок 2.2 – Конечно-разностная сетка

После определяем значение температуры в i -ом узле в момент времени $t = t_n = n \cdot \tau$, где τ – шаг интегрирования.

Произведём замену дифференциальных операторов на их конечно-разностные аналоги. В результате получим СЛАУ:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \quad i=2, \dots, N-1, \quad n \geq 0.$$

Данную схему аппроксимации можно представить графически. На рисунке 2.3 представлен шаблон четырехточечной схемы [94].

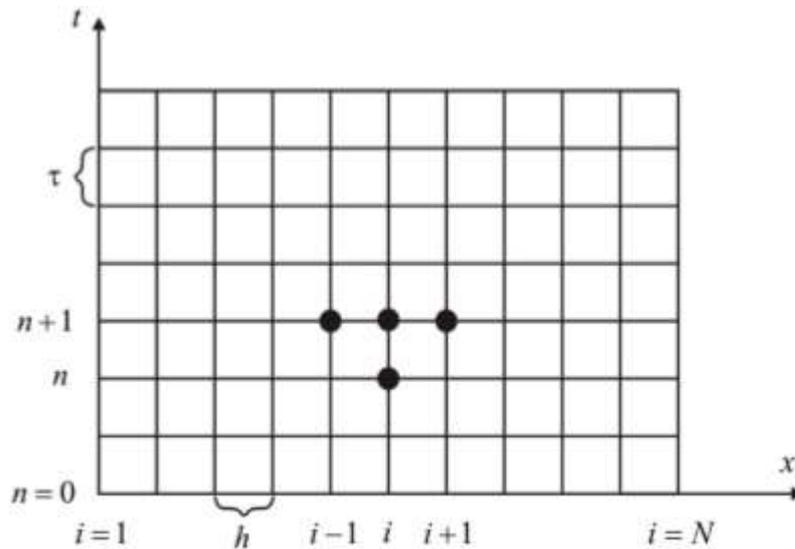


Рисунок 2.3 – Шаблон четырехточечной схемы

Используя неявную схему, берем одну точку со старого временного слоя и три на новом временном слое. Температура представлена неявно.

Полученную систему сводим к общему виду (трехточечное разностное уравнение второго порядка):

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i,$$

$$\text{где } A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}, B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}, F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_i^n.$$

После преобразования уравнения, получаем:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}} T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i B_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}},$$

из данного уравнения можно найти прогоночные коэффициенты:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i B_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}.$$

Прогонка будет являться корректной, если знаменатели не обращаются в ноль. В последнем узле определяется значение температуры. После этого методом обратной прогонки находим распределение температур. На рисунке 2.4 представлена блок-схема.



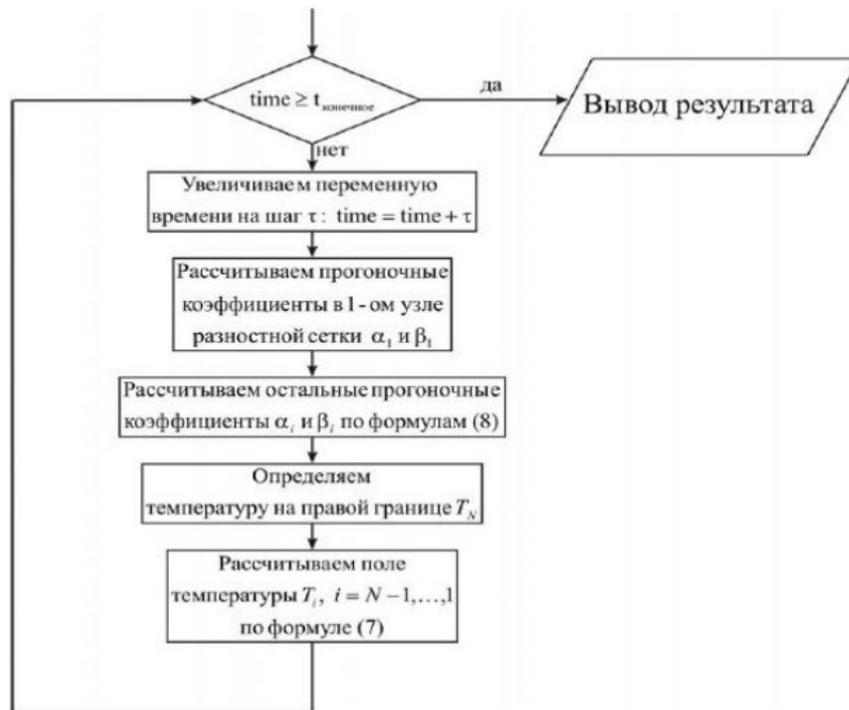


Рисунок 2.4 – Блок-схема

Численное решение задачи данной работы будет реализоваться на языке MatLab.

2.3 Граничные условия второго, третьего и четвертого рода

Для полного анализа влияния лесных пожаров на поверхности деревянного строения, необходимо знать граничные условия. В качестве примера рассмотрим задачу с заданными тепловыми потоками (рис. 40), математическая формулировка, где граничные условия второго рода которой:

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_1, t > 0;$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_2, t > 0;$$

На рисунке 2.5 представлена геометрия задачи

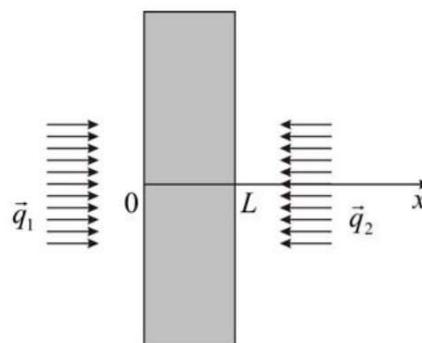


Рисунок 2.5 – Геометрия задачи

$q_1 > 0, x = 0$ материал нагревается;

$q_1 < 0, x = 0$ материал охлаждается;

$q_2 > 0, x = L$ материал охлаждается;

$q_2 < 0, x = L$ материал нагревается.

Сделаем предположение, что на границе выполняется уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

Где a – коэффициент температуропроводности материала.

Путем дискретизации и разложения функции в ряд Тейлора получим:

$$T_N^{n+1} = \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda \cdot \beta_{N-1} - 2 \cdot a \cdot \tau \cdot h \cdot q_2 + h^2 \cdot \lambda \cdot T_N^n}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda \cdot (1 - \alpha_{n-1})}.$$

Граничные условия третьего рода:

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_1(T^{e1} - T), t > 0, k_1 > 0;$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k_2(T^{e2} - T), t > 0, k_2 > 0;$$

Где T^{e1}, T^{e2} – температуры окружающей среды, k_1, k_2 – коэффициенты теплоотдачи.

Путем определения прогоночных коэффициентов и дискретизации, получаем:

$$T_N^{n+1} = \frac{h^2 \cdot \lambda \cdot T_N^n + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (\lambda \cdot \beta_{N-1} + h \cdot k_2 \cdot T^{e2})}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot (h \cdot k_2 + \lambda \cdot (1 - \alpha_{n-1}))}.$$

Граничные условия четвертого рода:

$$\begin{cases} -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} \right)_{\Gamma} = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \vec{n}} \right)_{\Gamma}; \\ T_1(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}, t) = T_2(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}, t) \end{cases}$$

Где $x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}$ – координаты границы раздела сред; T_1, T_2 – температуры соприкасающихся сред.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T).$$

2.4 Задача с химической реакцией в материале

Так как, лесные пожары сопровождаются химическими реакциями, логично рассмотреть задачу теплопроводности с химической реакцией в материале. Уравнение теплопереноса в пластине, подверженной термическому разложению имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_{\text{хим}} k_0 \rho \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), 0 < x < L;$$

$$T = 0: T = T_0, 0 \ll x \ll L;$$

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T^e - T), t > 0;$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T^e - T), t > 0;$$

где $q_{\text{хим}}$ – тепловой эффект химической реакции, k_0 – предэкспонент химической реакции, E – энергия активации химической реакции, $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

Дальнейшее решение сводится к методу конечных разностей, описанному выше:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right) + q_{\text{хим}} k_0 \rho \exp\left(-\frac{E}{RT_i^{n+1}}\right),$$

$$i=2, \dots, N-1, n \geq 0.$$

Полученную систему сводим к общему виду:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i,$$

$$\text{где } A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}, B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}, F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_i^n - q_{\text{хим}} k_0 \rho \exp\left(-\frac{E}{RT_i^{n+1}}\right).$$

2.5 Двухслойная пластина

Так как деревянное строение имеет несколько слоев, необходимо также рассмотреть постановку задачи двухслойной пластины. На рисунке 2.6 представлена геометрия задачи.

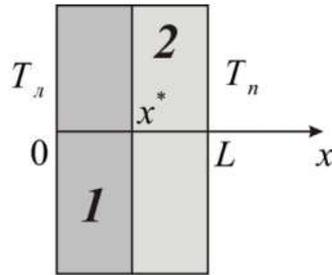


Рисунок 2.6 – Геометрия задачи

Математически задача будет иметь вид:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x^*; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, 0 < x < x^*; \end{cases}$$

Запишем начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L;$$

$$x = 0: T = T_n, t > 0;$$

$$x = L: T = T_n, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*}. \end{cases}$$

Подобная задача решается проводится численно на основе неявной разностной схемы. Граничное условие IV рода используется для определения прогоночных коэффициентов в точке x^* .

2.6 Испарение материала

При горении деревянной конструкции происходит испарение материала. Поэтому для описание более полной картины нашей задачи, рассмотрим реакцию с фазовым переходом на границе – испарение материала, математическая постановка задачи будет выглядеть:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < L;$$

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L;$$

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q - w_{\text{исп}} \cdot Q_{\text{исп}}, t > 0;$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q - w_{\text{исп}} \cdot Q_{\text{исп}}, t > 0;$$

Где $w_{\text{исп}} = \frac{A \cdot (P^H - P^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}$ – скорость испарения, $P^H = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{исп}}}{RT}\right)$ – давление

насыщенного пара, A – коэффициент аккомодации, P_0 – предэкспонент фазового перехода, $Q_{\text{исп}}$ – энергия активации процесса испарения, $P^* = P_{\text{атм}}$.

2.7 Двумерная задача для однородного тела

Для простоты решения нашей задачи, представим на рисунке 2.7 теплоперенос в однородной пластине.

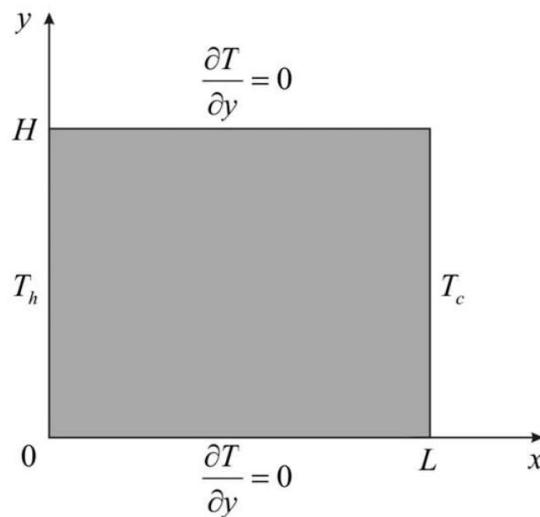


Рисунок 2.7 – Однородная пластина

Для двумерной задачи математическая постановка будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{cases} 0 < x < L; \\ 0 < y < H. \end{cases}$$

Запишем начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L; 0 \leq y \leq H;$$

$$x = 0: T = T_h, t > 0;$$

$$x = L: T = T_c, t > 0;$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

$$y = H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

Дальнейшее решение сводится к решению МКР описанному выше. Аппроксимируем дифференциальное уравнение с помощью пространственно-временной сетки. После всех преобразований получаем:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h_y^2} \right)$$

Полученное уравнение (1) сводим к общему виду:

$$A_i \cdot T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \cdot T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i,$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h_x^2}$, $B_i = \frac{2\lambda}{h_x^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}$, $F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} T_{i,j}^n$.

2.8 Двумерная задача для неоднородного тела

Для приближения нашего решения задачи к более реальным условиям, рассмотрим пример теплопереноса в неоднородной пластине на рисунке 2.8.

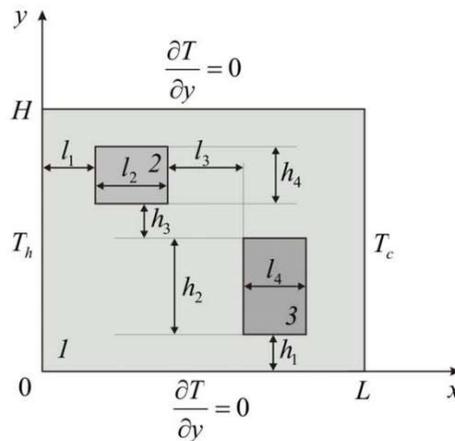


Рисунок 2.8 – Неоднородная пластина

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < l_1, 0 < y < H; \\ l_1 \leq x \leq l_1 + l_2, 0 < y < h_1 + h_2 + h_3, h_1 + h_2 + h_3 + h_4 < y < H; \\ l_1 + l_2 < x < l_1 + l_2 + l_3, 0 < y < H; \\ l_1 + l_2 + l_3 \leq x \leq l_1 + l_2 + l_3 + l_4, 0 < y < h_1, h_1 + h_2 < y < H; \\ l_1 + l_2 + l_3 + l_4 < x < L, 0 < y < H; \end{array} \right. \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), l_1 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 + h_2 + h_3 < y < h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right), l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 < y < h_1 + h_2. \end{array} \right.$$

Запишем начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L; 0 \leq y \leq H;$$

$$x = 0: T = T_h, t > 0;$$

$$x = L: T = T_c, t > 0;$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

$$y = H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = l_1, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \\ x = l_1 + l_2, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = h_1 + h_2 + h_3, l_1 < x < l_1 + l_2, \\ y = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, l_1 < x < l_1 + l_2, \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = l_1 + l_2 + l_3, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2, \\ x = l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = h_1, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \\ y = h_1 + h_2, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4. \end{cases}$$

Далее вводится пространственно-временная сетка и производится поэтапное решение уравнений.

2.9 Задача с зависящими от температуры коэффициентами теплопроводности

Во многих реальных ситуациях коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Рассмотрим пример расчета коэффициента теплопроводности диоксида урана UO_2 :

$$\lambda(T) = \frac{5500}{560 + T} + 0.942 \cdot 10^{-1} T^3$$

Нелинейное

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), 0 < x < L.$$

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L;$$

$$x = 0: T = T_h, t > 0;$$

$$x = L: T = T_c, t > 0.$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{h} \left(\lambda_{i+1/2}^n \cdot \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{h} - \lambda_{i-1/2}^n \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{h} \right),$$

$$\text{где } \lambda_{i+1/2}^n = \frac{\lambda_i^n - \lambda_{i+1}^n}{h}, \lambda_{i-1/2}^n = \frac{\lambda_{i-1}^n + \lambda_i^n}{h}.$$

3 Результаты исследования

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

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ14	Мязина Софья Андреевна

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- дополнительная заработная плата - 15% - накладные расходы - 20% - районный коэффициент - 30% - норма амортизации - 40-50%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Размер отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ	- анализ конкурентных технических решений; - SWOT-анализ; - описание потенциальных потребителей;
2. Планирование и формирование бюджета научно-технического проекта	- планирование работ; - разработка графика Ганта; - формирование бюджета затрат на научное исследование.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	- Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Многоугольник конкурентоспособности
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2023
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСТН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н		01.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		01.03.2023

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

Целью данного раздела является экономическое обоснование технического решения научно-исследовательской работы (НИР), которое состоит в определении затрат на осуществление технического решения и получаемого эффекта.

В данной работе рассматривается математическое моделирование влияния лесного пожара на элементы деревянного строения. Для математического моделирования использовалась среда программирования MatLab.

Для достижения поставленной цели сформулировали задачи:

1. Определение этапов работы;
2. Определение продолжительности этапов работы;
3. Расчет затрат необходимых для НИР;
4. Расчет рентабельности проекта;
5. Оценка научно-технической результативности НИР.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Математическое моделирование лесных пожаров – перспективный способ, применяющийся для прогнозирования лесных пожаров. Прогноз лесной пожарной опасности является очень актуальной проблемой. Для прогнозирования лесных пожаров создаются различные системы на основе математического моделирования, к примеру, ГИС. Система охраны природных территорий от пожаров в России сложна и запутана. За участки разной ведомственной подчиненности, относящиеся к разным типам земель, находящиеся в разных формах собственности отвечают разные структуры:

1) За выработку государственной политики и общую координацию действий государственных органов в области пожарной безопасности отвечает МЧС.

2) За охрану земель лесного фонда от пожаров и за тушение лесных пожаров на землях лесного фонда отвечают органы управления лесами (Рослесхоз в Московской области, региональные органы управления лесами - в остальных регионах).

3) За охрану лесов на землях обороны и безопасности и за тушение пожаров в них отвечает Минобороны РФ, за охрану лесов на землях особо охраняемых природных территорий федерального значения и тушение пожаров в них отвечает Минприроды РФ.

4) За осуществление мер пожарной безопасности на других природных территориях отвечают собственники земельных участков.

Все перечисленные выше структуры и являются основными потребителями систем прогнозирования лесных пожаров на основе математического моделирования.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Для успешного внедрения научной разработки необходимо изучить преимущества и недостатки конкурирующих методов исследования воспламенения ветви кустарника в высокотемпературной среде для прогнозирования верховых пожаров. В данном случае нет смысла сравнивать предприятия-конкуренты, т.к. проект является научной работой. Сравнение будет производиться между тремя методами, с помощью которых можно получить данные по воспламенению ветви кустарника в высокотемпературной среде. В проекте используется метод математического моделирования, его конкурентами являются экспериментальные исследования и комбинированный метод.

Конкуренты:

- ЭИ – Экспериментальные исследования – получение данных по воспламенению ветви путем проведения опытов;
- КМ – Комбинированный метод – получение данных путем совмещения опытных результатов и результатов математического моделирования;
- ММ – Математическое моделирование – получение данных по воспламенению ветви кустарника в программной среде MatLab;

Список критериев и их вес из таблицы 4.1 подбирался и оценивался совместно с экспертом (научным руководителем).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных методов

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		ЭИ	КМ	ММ	$K_{ЭИ}$	$K_{КМ}$	$K_{ММ}$
1. Экологичность	0,1	1	2	5	0,1	0,2	0,5
2. Трудоемкость метода	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
3. Скорость выполнения исследования	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
4. Общая стоимость метода	0,2	3	2	4	0,6	0,4	0,8
5. Точность измерений	0,2	4	5	3	0,8	1,0	0,6
6. Безопасность инженера во время выполнения работы	0,2	3	3	5	0,6	0,6	1,0
7. Доступность метода	0,1	3	2	5	0,3	0,2	0,5
Итого	1				3,2	3,0	4,4

В таблице 4.1 представлены основные конкуренты и критерии оценки конкурентоспособности. Каждый показатель конкурентов оценивается по пятибалльной

шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей определяются в соответствии с их значимостью и в сумме составляют 1. По таблице видим, что экспериментальные исследования и комбинированный метод имеют примерно одинаковое количество баллов. По баллам математическое моделирование превосходит своих конкурентов, это говорит о том, что данный метод может конкурировать с существующими методами в поставленных для него задачах. На рисунке 4.1 наглядно представлены преимущества и недостатки предложенного и существующих методов исследования влияния лесного пожара на деревянное строение в сельской местности.

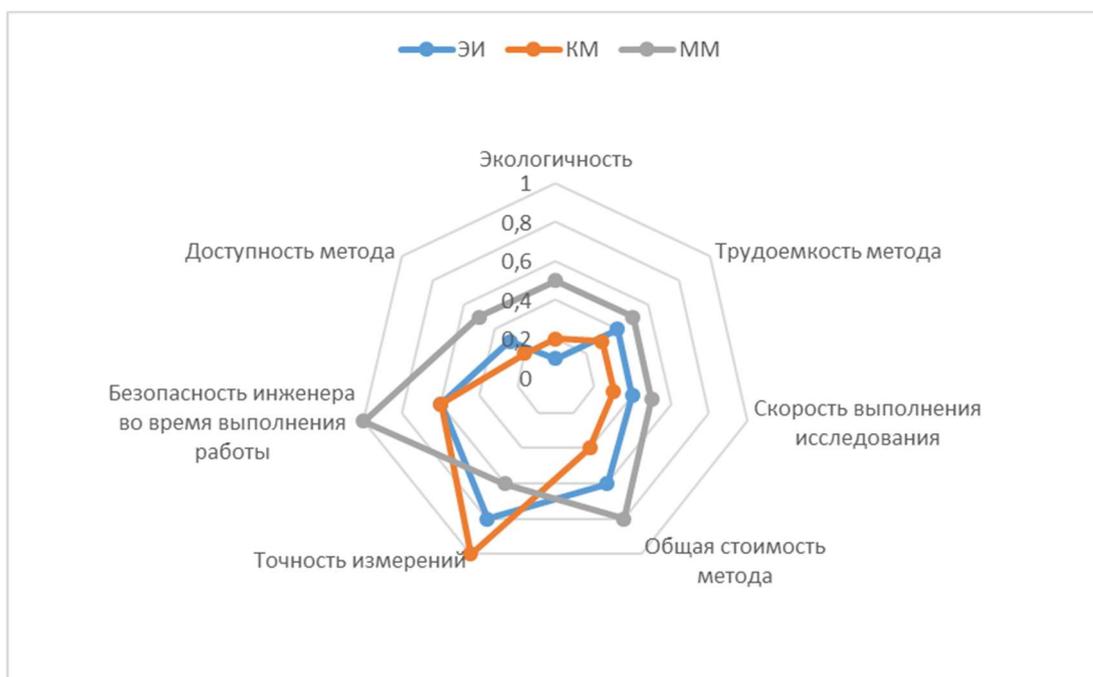


Рисунок 4.1 – Многоугольник конкурентоспособности

Рисунок показывает, что математическое моделирование проигрывает в точности измерения обоим методам, но имеет преимущество по таким показателям, как безопасность инженера во время выполнения работы, экологичность, скорость выполнения исследования, имеет минимальную трудоемкость.

4.3 SWOT – анализ

SWOT анализ – это метод оценки ситуации и будущих перспектив проекта, основная задача которого: определить сильные и слабые стороны, возможности и угрозы со стороны внешней окружающей среды. На основании анализа делаются выводы: правильно ли развивается проект, какие риски нужно предусмотреть, что следует делать, каковы перспективы проекта.

Оценочная карта составлялась на основе выявления сильных и слабых сторон метода математического моделирования перед комбинированным методом и экспериментальным

методом. Данные основывались на прочитанной научной литературе и мнении эксперта в данной области (руководитель проекта). В таблице 4.2 представлен SWOT-анализ

Таблица 4.2 – SWOT- анализ

<p>Сильные стороны: С1. Бесплатное программное обеспечение для математического моделирования; С2. Экологичность метода; С3. Более низкая стоимость по сравнению с другими методами; С4. Возможность моделирования пожара до его возникновения.</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Результаты исследования не были ранее опубликованы и оценены научным сообществом; Сл2. Отсутствие прототипа научной разработки; Сл3. Риск возникновения погрешности; Сл4. Отсутствие инженеринговой компании, способной осуществить разработку модели.</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ; В2. Увеличение спроса на новый продукт; В3. Модернизация методов моделирования; В4. Рост стоимости оборудования и, следовательно, рост цены ошибки без применения моделирования.</p>	<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые природоохранные технологии; У2. Введение дополнительных требований к программному обеспечению; У3. Удешевление других методов; У4. Увеличение стоимости программного обеспечения.</p>

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица возможностей

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны				Слабые стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
В1	+	-	-	-	-	-	+	-
В2	+	+		-	-	-	-	-
В3	-	-	+	-	+	-	-	-
В4	-	-	+	-	-	-	-	-

В таблице 4.4 представлена интерактивная матрица возможностей

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны				Слабые стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
У1	-	-	-	-	-	-	-	+
У2	-	-	-	-	-	-	-	-
У3	-	-	+	-	-	-	-	-
У4	-	-	+	-	-	-	-	-

В таблице 4.5 представлена интерактивная матрица возможностей

Таблица 4.5 – Расширенная матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны: С1. Бесплатное программное обеспечение для математического моделирования; С2. Экологичность метода; С3. Более низкая стоимость по сравнению с другими методами; С4. Возможность моделирования пожара до его возникновения.</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Результаты исследования не были ранее опубликованы и оценены научным сообществом; Сл2. Отсутствие прототипа научной разработки; Сл3. Риск возникновения погрешности; Сл4. Отсутствие инжиниринговой компании, способной осуществить разработку модели.</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ; В2. Увеличение спроса на новый продукт; В3. Модернизация методов моделирования; В4. Рост стоимости оборудования и, следовательно, рост цены ошибки без применения моделирования.</p>	<p>В1В2С1. В короткие сроки с минимальными затратами создание качественной математической модели; В3В4С3. Увеличение эффективности предварительного моделирования; В2С2. Внедрение метода в работу систем не будет проблематичным, так как он является экологичным.</p>	<p>Сл3В1. При возникновении риска погрешностей можно использовать инновационную инфраструктуру ТПУ, которая поможет свести погрешности к минимуму. Сл1В3. Перевод внимания с математического моделирования на другие методы.</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые природоохранные технологии; У2. Введение дополнительных требований к программному обеспечению; У3. Удешевление других методов; У4. Увеличение стоимости программного обеспечения.</p>	<p>У4У3С3. При увеличении стоимости программного обеспечения произойдет и увеличение стоимости всего математического моделирования, что может повлиять на конкурентоспособность.</p>	<p>Сл4У1. При отсутствии достаточной базы знаний у людей, которые могут осуществить инвестирование проекта из-за новизны разработки, служит весомым фактором в неосознанности актуальности данной проблемы. Проект может быть заморожен из-за недостающей финансовой составляющей.</p>

4.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках исследования;

- определение участников работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения исследований;

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Перечень этапов работ при проектировании

№	Содержание работ	Исполнитель
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
2	Выбор темы и направления моделирования	Руководитель, инженер
3	Теоретические исследования, проведение обзора литературы	Инженер
4	Составление плана проведения занятий и выбора метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	Руководитель, инженер
5	Написание программы в среде MatLab	Инженер
6	Проведение исследования	Инженер
7	Обработка результатов	Инженер
8	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов	Руководитель, инженер
9	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	Инженер
10	Проверка проекта	Руководитель

4.4.2 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

В 2023 году 365 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 247 рабочих дней, 104 выходных и 14 нерабочих праздничных дней

Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный ленточный график, на котором работы по разрабатываемому проекту представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48;$$

Для удобства построения графика продолжительности работ, длительность каждого из этапов работ следует перевести в календарные дни. Для осуществления данного перевода существует следующая формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

где T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения сведем в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Содержание работ/ затрачиваемый промежуток времени для участника в % соотношении	T_{pi}	T_{ki}	Начало	Конец	Кол-во календарных дней, затрачиваемых на работу каждым участником проекта
1	Составление ТЗ (Руководитель – 100%)	2	3	0	3	Руководитель – 3 дня
2	Выбор темы и направления проведения эксперимента (Руководитель – 50%, инженер – 50%)	2	3	3	6	Руководитель – 1,5 дня Инженер – 1,5 дня
3	Теоретические исследования, проведение обзора литературы (Инженер – 100%)	14	21	6	27	Инженер – 21 день
4	Составление плана проведения занятий и выбора метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования (Руководитель – 50%, инженер – 50%)	2	3	27	30	Руководитель – 1,5 дня Инженер – 1,5 дня
5	Написание программы в среде MatLab (Инженер – 100%)	22	33	30	63	Инженер – 33 дня
6	Проведение исследования (Инженер – 100%)	10	15	63	78	Инженер – 15 дней
7	Обработка результатов (Инженер – 100%)	8	12	78	90	Инженер – 12 дней
8	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов (Руководитель – 20%, инженер – 80%)	10	15	90	105	Руководитель – 3 дня Инженер – 12 дней
9	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки (Инженер – 100%)	10	15	105	120	Инженер – 15 дней

Продолжение таблицы 4.7

10	Проверка проекта (Руководитель – 100%)	2	3	120	123	Руководитель – 3 дня
----	---	---	---	-----	-----	----------------------

На основе таблицы 4.7 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Календарный план-график проведения исследований

№	Вид работы	Исполнители	T_{ki} (кал.дн.)	Продолжительность выполнения работ															
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	3	■															
2	Выбор темы и направления моделирования	Руководитель, инженер	3	■															
3	Теоретические исследования, проведение обзора литературы	Инженер	21		■	■	■												
4	Составление плана проведения занятий и выбора метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	Руководитель, инженер	3				■												
5	Написание программы в среде MatLab	Инженер	33				■	■	■	■									
6	Проведение исследования	Инженер	15							■	■								
7	Обработка результатов	Инженер	12								■	■							
8	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов	Руководитель, инженер	15									■	■	■					
9	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	Инженер	15											■	■	■			
10	Проверка проекта	Руководитель	3															■	

■	Руководитель
■	Инженер

Срок выполнения данного проекта составляет 123 дня. Как видно из графика, самый затратный по времени этап научного исследования это написание программы в среде MatLab, а также теоретические исследования с проведением обзора литературы. Из них научный руководитель работает порядка 12 календарных дней, инженер – 111 календарный день. Большая нагрузка в работе приходится на инженера, так как он является основным исполнителем проекта. Работы были начаты заблаговременно, поэтому проект будет выполнен в срок. Составление графика работ является одной из ключевых частей для успешного выполнения проекта.

4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

4.5.1 Расчет материальных затрат НТИ

При планировании бюджета проекта необходимо учесть все виды расходов, которые связаны с его выполнением. К материальным затратам относятся: приобретаемые со стороны сырье и материалы, покупные материалы, канцелярские принадлежности, картриджи и т.п. Список материальных затрат приведен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Материальные затраты проекта

Наименование	Цена за единицу, руб	Кол-во, шт	Затраты на материалы (З _м), руб
Краска для принтера	650	1	650
Тетрадь 48 листов	45	1	45
Упаковка офисной бумаги	380	1	380
Ручки	45	2	90
Итого за материалы			1165
Транспортно-заготовительные расходы			58
			1223

В сумме материальные затраты составили 1223 рублей. Цены приняты средние по городу Томск.

4.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В данный вид затрат включаем 1 персональный компьютер, стоимость которого принимаем 60000 рублей, а также лицензионный продукт «MatLab» – 80000 рублей.

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Срок полезного использования для офисной техники составляет от 2 до 3 лет, для программного обеспечения от двух лет.

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{T} \cdot 100\%$$

Где T – срок полезного использования, лет.

Примем срок полезного использования для компьютера принять равным 2,5 года, а для программного обеспечения – 2 года.

Расчет амортизации приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Амортизация

Объекты	Норма амортизации	Первич. стоимость	Величина амортизации в год	Кол-во работы в год	Амортизация в час	Кол-во часов работы	$C_{\text{Аморт}}$
Компьютер	40	60000	24000	1979	12,13	656	7957,28
Лицензионный MatLab	50	80000	40000	1008	38,68	336	12996,48
Итого:				20953,76			

Округлим стоимость затрат на специальное оборудование, получим 20954 рубля

4.5.3 Основная заработная плата исполнителей

Расходы по заработной плате определяются по трудоемкости выполняемой работы и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Полная заработная плата работника:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата работника, руб.; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата работников, участвующих в работе над проектом

Основная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата; $T_{\text{раб}}$ – суммарная продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником, выраженная в рабочих днях.

Размер среднедневной заработной платы:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года ($M = 11,2$ для 5-ти дневной рабочей недели; $M = 10,4$ для 6-ти дневной рабочей недели); $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей проекта, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.; $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

На основании таблицы 4.8 рассчитает количество рабочих дней для руководителя и инженера, результаты представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Содержание работ/ затрачиваемый промежуток времени для участника в % соотношении	T_{pi}	T_{pi} для руководителя	T_{pi} дл инженера
1	Составление ТЗ	2	2	0
2	Выбор темы и направления проведения эксперимента	2	1	1
3	Теоретические исследования, проведение обзора литературы	14	0	14
4	Составление плана проведения занятий и выбора метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	2	1	1
5	Написание программы в среде MatLab	22	0	22
6	Проведение исследования	10	0	10
7	Обработка результатов	8	0	8
8	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов	10	2	8
9	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	10	0	10
10	Проверка проекта	2	2	0
Итого		82	8	74

Заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{м}} = 39300 \cdot 1,3 = 51090 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{60450 \cdot 10,4}{365 - 14 - 104} = 2545 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 2545 \cdot 8 = 20360 \text{ руб.}$$

Заработная плата инженера:

$$Z_{\text{м}} = 16300 \cdot 1,3 = 21190 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{21190 \cdot 10,4}{365 - 14 - 104} = 892 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 892 \cdot 74 = 66008 \text{ руб.}$$

Суммарная заработная плата руководителя и инженера:

$$Z_{\text{зп}} = 20360 + 66008 = 86368 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$, руб	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{раб}}$, раб.дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб
Руководитель	39300	1,3	2545	8	20360
Инженер	16300	1,3	892	74	66008

4.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принимаем равным 0,15.

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 20360 = 3054 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера:

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 66008 = 9901 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата руководителя и инженера:

$$Z_{\text{доп}} = 3054 + 9901 = 12955 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы исполнителей представлен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет заработной платы исполнителей

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	20360	66008
Дополнительная зарплата	3054	9901
Зарплата исполнителя	23414	75909
Итого о статье $C_{\text{зп}}$	99323	

4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды включают в себя установленные законодательством Российской Федерации нормы органов государственного социального

страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ) и медицинское страхование (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величину отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2023 г. в соответствии с Федеральным законом №361 - ФЗ вводятся пониженные тарифы страховых взносов для отдельных категорий плательщиков (для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность) равный 30,2%.

Таким образом, отчисления во внебюджетные фонды для руководителя проекта составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 23414 = 7071 \text{ руб.}$$

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера проекта составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 75909 = 22925 \text{ руб.}$$

Итого отчисления во внебюджетные фонды составляют 29996 рублей.

4.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов. Накладные расходы находятся по выражению:

$$С_{накл} = (З_{осн} + З_{доп}) \cdot k_{накл};$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов, примем равным 20%,

$$С_{накл} = (86368 + 12955) \cdot 0,2 = 19865 \text{ руб.}$$

4.5.7 Формирование затрат на проектирование

Определение бюджета затрат на проект приведено в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Бюджет затрат на проект

№	Наименование статьи	Сумма, руб	В % к итогу
1	Материальные затраты проекта	1223	0,7
2	Затраты на оборудование	20954	12,2
3	Затраты по основной заработной плате	86368	50,4
4	Затраты по дополнительной заработной плате	12955	7,6
5	Отчисления во внебюджетные фонды	29996	17,5
6	Накладные расходы	19865	11,6
Бюджет затрат на проектирование		171361	100

Суммарный бюджет проекта равен 171361 рублей, где наибольший процент бюджета составляют затраты на покрытие основной заработной платы исполнителей в размере 86368 рублей или 50,4 % к общей сумме бюджета.

4.6 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.

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Оценка ресурсоэффективности проводится для двух различных вариантов выполнения поставленной задачи. Первым вариантом исполнения является вариант с использованием лицензированного продукта «MatLab», вторым – продукт «Ansys Fluent».

Отличие максимальной стоимости исполнения от стоимости i -го варианта обусловлено тем, что могут возникнуть дополнительные материальные затраты на приобретение ПО, если площадка, на которой проводится данное исследование, не обладает соответствующей лицензией.

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{171361}{240000} = 0,714;$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{240000}{240000} = 1.$$

В ходе оценки проекта с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения определяется его интегральный показатель ресурсоэффективности, позволяющий установить направление его дальнейшего улучшения и осуществления. Для этого были выбраны несколько критериев эффективности:

- 1) Технологичность;
- 2) Надежность;
- 3) Удобство в эксплуатации;
- 4) Экономичность;
- 5) Гибкость;

Определение ресурсоэффективности происходит на основе интегрального показателя ресурсоэффективности

$$I_{pi} = \sum (a_i \cdot b_i),$$

где a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – балльная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

В таблице 4.15 наглядно показана значимость каждого критерия для данного проекта.

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик разрабатываемого проекта

Критерии	Объект исследования		
	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2
Технологичность	0,21	5	5
Надежность	0,12	4	3
Удобство в эксплуатации	0,23	5	4
Экономичность	0,14	4	4
Гибкость	0,30	5	4

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{\text{исп.1}}^p = 5 \cdot 0,21 + 4 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,23 + 4 \cdot 0,14 + 5 \cdot 0,30 = 4,74;$$

$$I_{\text{исп.2}}^p = 5 \cdot 0,21 + 3 \cdot 0,12 + 4 \cdot 0,23 + 4 \cdot 0,14 + 4 \cdot 0,30 = 4,09.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p,i}}{I_{\text{фин}}}$$

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{4,74}{0,714} = 6,64,$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{4,09}{1} = 4,09,$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$)

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{6,64}{4,09} = 1,62.$$

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является выполнение работы по первому исполнению.

Выводы по разделу

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Таковыми являются государственные структуры, заведующие лесами, а также МЧС. Можно сделать

вывод, что проект является актуальным, т.к. он может помочь в системах прогнозирования лесных пожаров, следовательно, перечисленные структуры заинтересованы в нем.

2. Проведен анализ конкурентных технических решений. Конкурентами являются другие методы, с помощью которых можно получить данные по воспламенению лесного горючего материала (экспериментальные исследования и комбинированный метод). Метод математического моделирования выступает лидером по многим параметрам. Оценочная карта для сравнения конкурентоспособности методов приведена в подразделе 4.1.2

3. При рассмотрении SWOT-анализа основными угрозами выступают: отсутствие спроса на новые природоохранные технологии; введение дополнительных требований к программному обеспечению; удешевление других методов; увеличение стоимости программного обеспечения.

Также, выявлены слабые стороны проекта, такие как отсутствие прототипа научной разработки; риск возникновения погрешности; отсутствие инжиниринговой компании, способной осуществить разработку модели. Возможные пути снижения влияния установленных угроз для проекта представлены в подразделе 4.1.3.

4. Составлена смета затрат на выполнение проекта. Стоит отметить, что основной статьей расходов на разработку проекта является полная заработная плата научно-технических работников и составляет 99323 рублей. Меньшая доля всех затрат уходит на материальные затраты – 1223 рубля. Затраты на оборудование составили 20954 руб. Общий бюджет разработки составил 171361 рублей. При этом запланированная продолжительность работы составляет 123 календарных дня.

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является выполнение работы по первому исполнению. В таблице 4.15 представлена оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

На основании полученных результатов данного раздела делаем вывод о том, что данный проект является экономически целесообразным и успешным.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ14	Мязина Софья Андреевна

Математическое моделирование воздействия конвективного теплового потока от фронта лесного пожара на инфраструктурные объекты железной дороги с учетом структурной неоднородности

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования: математическое моделирование влияния лесного пожара на элементы инфраструктурные объекты железной дороги</p> <p>Область применения: прогнозирование лесных пожаров инфраструктурных объектов железной дороги.</p> <p>Разработка математического моделирования производится в лабораторной аудитории в учебном заведении.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность:</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов и опасных факторов</p> <ul style="list-style-type: none"> • Природа воздействия • Действие на организм человека • Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов) • СИЗ коллективные и индивидуальные <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов</p> <ul style="list-style-type: none"> • Термические источники опасности • Электробезопасность • Пожаробезопасности 	<p>1. Вредные факторы:</p> <p>1.1 Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры;</p> <p>1.2 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>1.3 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>1.4 Недостаточная освещенность.</p> <p>Проведен расчет освещения рабочего места;</p> <p>2. Опасные факторы:</p> <p>2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R_{заземления}, СКЗ, СИЗ;</p> <p>2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.</p>
---	---

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> Выбросы в окружающую среду Решения по обеспечению экологической безопасности 	<p>Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника,) и способы их утилизации;</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ol style="list-style-type: none"> Перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы в том и другом случае.</p>
<p>4. Перечень нормативно-технической документации.</p>	<p>ГОСТы, СанПиНы, СНиПы</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2023
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		01.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		01.03.2023

5 Социальная ответственность

Введение

Социальная ответственность – ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В ходе данной работы разработка и исследование математического моделирования влияния лесного пожара на инфраструктурные объекты железной дороги с учетом структурной неоднородности. Работа выполнялась в лабораторной аудитории учебного заведения. Все работы выполнялись с использованием компьютера. Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

5.1 Вредные факторы

5.1.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 5.1 и 5.2:

Таблица 5.1 - Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-23	40-60	0.1
Теплый	23-25		0.2

Таблица 5.2 - Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0.5
Теплый	22	28	20-80	<0.5

Общая площадь рабочего помещения составляет 28 м², объем составляет 147м³. По СанПиН 2.2.2.542-96 санитарные нормы составляют 6,0 м² и 24,0 м³ объема на одного человека. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основной недостаток - приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно нормам СанПиН 2.2.2.542-96 объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40 м³[95]. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 42 м³, из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 70°С, а в теплое время года – за счет кондиционирования, с параметрами согласно. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям [97].

5.1.2 Превышение уровней шума

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается вентиляционным и рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96,

при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 80 дБА [98].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов, например любой пористый материал – шамотный кирпич, микропористая резина, поролон и др.);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты:

1. применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

5.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2.542-96 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц, 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400кГц [95]. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250нТл, и 25нТл в диапазоне от 2 до 400кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В [95]. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа ASUS TUF Gaming со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В.

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения (по *ОСТ 54 30013-83*):

- а) до 10 мкВт/см², время работы (8 часов);

- б) от 10 до 100 мкВт/см², время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до 1000 мкВт/см², время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ

1. защита временем;
2. защита расстоянием;
3. снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
4. заземление экрана вокруг источника;
5. защита рабочего места от излучения;

СИЗ

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

2. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO₂).

5.1.4 Недостаточная освещенность

Для обеспечения требуемой освещенности необходимо использовать совмещенное освещение, создаваемое сочетанием естественного и искусственного освещения. При данном этапе развития осветительной техники целесообразно использовать люминесцентные лампы, которые по сравнению с лампами накаливания имеют большую светоотдачу на ватт потребляемой мощности и более естественный спектр.

Минимальный уровень средней освещенности на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должен быть не менее 200 лк.

В расчётном задании должны быть решены следующие вопросы:

- выбор системы освещения;
- выбор источников света;
- выбор светильников и их размещение;
- выбор нормируемой освещённости;
- расчёт освещения методом светового потока.

В данном расчётном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{рас}} = E_{\text{н}} * S * K_{\text{з}} * Z/N * \eta$$

Где $E_{\text{н}}$ – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк; S – площадь освещаемого помещения, м^2 ; $K_{\text{з}}$ – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли (табл. 4.9); Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{min}}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1; N – число ламп в помещении; η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен $\rho_{\text{с}}$ и потолка $\rho_{\text{п}}$.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B)$$

Проведем расчет индекса помещения:

Площадь помещения :

$$S = A * B = 6 * 8 = 48 \text{ м}^2$$

Индекс:

$$i = S / (h * (A + B)) = 48 / (2,3 * (6 + 8)) = 1,49$$

Согласно этим данным коэффициент использования светового потока будет равен 50 % или в долях = 0,5.

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно (табл. 4.10) [БЖД Практикум 2009-2020].

Согласно указанной методике выбираем тип источника света.

Наиболее подходящим вариантом является 40 ваттная лампа ЛБ, у которой $\Phi = 2800$ лм. Для выбранного типа лампы подходит светильник ОД-2-40 с размерами: длина = 1230 мм, ширина = 266 мм.

Из уравнения 1.4.1 находим количество ламп для помещения

$$N = E_H * S * K_3 * Z / \Phi * \eta = 400 * 48 * 1,3 * 1,1 / 2800 * 0,5 = 19,61;$$

Принимаем $N=20$ ламп или 10 светильников..

Размещаем светильники в 4 ряда по 5 светильников в ряду с соблюдением условий:
 L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B), L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B), l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Сначала определим световой поток расчетный.

$$\Phi = E_H * S * K_3 * Z / \eta = 400 * 48 * 1,3 * 1,1 / 20 * 0,5 = 2745,6 \text{ лм};$$

Проведем проверку выполнения условия соответствия:

$$- 10\% \leq ((\Phi_{\text{расч}} - \Phi_{\text{станд}}) / \Phi_{\text{расч}}) * 100\% \leq + 20\%$$

Подставляя численные значения получаем:

$$- 10\% \leq (2800 - 2745,6) / 2745,6 * 100\% \leq + 20\%$$

$$- 10\% \leq +1,98\% \leq + 20\%$$

Результат расчета укладывается в допустимые пределы.

Определим мощность осветительной установки:

$$P = N * P_i = 20 * 40 \text{ Вт} = 800 \text{ Вт}.$$

5.2 Электроопасность и поражение электрическим током

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного сприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [100].

Лабораторная аудитория учебного заведения относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1 \text{ А}$; $U < (2-36) \text{ В}$; $R_{\text{зазем}} < 4 \text{ Ом}$ [105]

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. — защитное заземление, зануление;
2. — малое напряжение;

3. — электрическое разделение сетей;
4. — защитное отключение;
5. — изоляция токоведущих частей;
6. — оградительные устройства.

7. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

5.3 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лабораторная аудитория относится к категории В – горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лабораторная аудитория учебного заведения полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рисунке 1, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

На рисунке 5.1 представлен план эвакуации.



Рисунок 5.1 – План эвакуации

5.4 Экологическая безопасность

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;
- разделить углеродистые металлы от цветмета;
- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить, спрессовать и упаковать для уменьшения объема;

- кофир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют ртутными парами

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Учебное заведение находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло- и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектродгенераторы; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа не прекратилась.

В лабораторной аудитории учебного заведения наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии учебное заведение необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной,

пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Заключение

В результате выполнения магистерской диссертации был проведен обзор литературы по тематике математического моделирования и лесных пожаров в этой области исследования. На основе изученного материала было проведено исследование распределения температуры в инфраструктурном объекте железной дороги про воздействию конвекции от фронта различных видов пожаров, а так же в различные сезоны года на основе математического моделирования.

В рамках теоретического исследования были сформулированы математические модели теплопереноса в инфраструктурном объекте железной дороги в двумерной постановке с учетом характерных неоднородностей и его состава. Рассмотрен физический механизм воздействия высокотемпературной среды на лесной горючий материал, разработана система допущений для математических моделей.

Полученные результаты будут иметь значение для практики, поскольку позволят лучше понять процесс распределения температуры по инфраструктурному объекту железной дороги во время лесного пожара. Программные реализации таких математических моделей могут быть использованы в системах прогнозирования лесной пожарной опасности, для разработки схем тушения лесных пожаров и экологических последствий лесных пожаров.

Выполнены разделы «Социальная ответственность», «Менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и раздел ВКР на иностранном языке.

Список публикаций

1. Мязина С.А. Математическое моделирование влияния лесного пожара на элементы деревянного строения // Бутаковские чтения: сб. статей II Всероссийской с международным участием молодежной конференции – Томск, 13-15 декабря 2022 г. – С. 163-166.

Список литературы

1. Названы регионы РФ с самой сложной ситуацией с лесными пожарами. URL: [Электронный ресурс] <https://iz.ru/1518500/2023-05-25/nazvany-regiony-rf-s-samoi-slozhnoi-situatsie-i-s-lesnymi-pozharami> (дата обращения 25.05.2023).
2. Manoj Kumar, Sweta Nisha Phukon, HukumSingh Forest Resources Resilience and Conflicts / The role of communities in sustainable land and forest management – 2021 – С. 24 – Р. 305-318.
3. Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии // Вопросы лесной пирологии / ИЛиД СО АН СССР. Красноярск, 1972. С. 171—231.
4. Пожарная безопасность. энциклопедия. - М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с.
5. Гусев В.Г., Лопухова Е.Л., Дубовый В.К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – № 1. – С. 134-145.
6. Михалев Ю.А. Виды вероятных лесных пожаров на землях лесного фонда Сибири, методы их оценки // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 10. – С. 132-137.
7. Ходаков В.Е, Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования монография. – Херсон: Гринь Д.С., 2011,– 417 с.
8. Валендик Э.Н., Кисильхов Е.К., Верховец С.В. Пожарная опасность на вырубках в темнохвойных лесах Красноярского края // Лесное хозяйство. 2003. № 3. С. 36—38.
9. Scott, J. H., and Reinhardt, E. D., Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior (Research Paper RMRS-RP-29), Rocky Mountain Research Station, US Forest Service, Fort Collins CO (2001).
10. Черных В. Л., Сысуев В. В. Информационные технологии в лесном хозяйстве: учебное пособие / Мин. образования РФ; Марийский гос. тех. университет. Йошкар-Ола, 2000. 377 с.
11. Аварийная спасательная служба №1 в Москве и Московской области. URL: [Электронный ресурс] <https://xrl.ru/> (дата обращения 18.05.2021).
12. Шешуков М.А. Пирогенез – важнейший фактор формирования лесов // Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1984. 99–100 с.
13. Софронов М.А. Лесные пожары в горах южной Сибири. М.: Наука, 1967. 148 с.

14. Morandini F., Santoni P.A., Balbi J.H. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope // *Fire Safety Journal*. 2001. Vol. 36. P. 519-543.
15. Scott S., Chris Lautenberger C., Fernandez-Pello C. Ignition of Combustible Fuel Beds by Hot Particles: An Experimental and Theoretical Study // *Fire Technology*. 2010. Vol. 47. P. 341-355.
16. Государственная противопожарная служба республики Марий Эл. URL: [Электронный ресурс] <http://ugps12.ru/?p=5364> (дата обращения 18.05.2021).
17. Арманд Д.Л. Наука о ландшафтах. М: Мысль, 1975. 141 с.
18. Огненный смерч. URL: [Электронный ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/Огненный_смерч (дата обращения 18.05.2021).
19. Авдеева А.А. Великий Московский пожар 1812 г. – Исторический пример огненного шторма // *Успехи современной науки и образования*. 2017. С. 52-56.
20. Гришин А.М., Рейно В.В. Экспериментальные исследования огненных смерчей // *Оптика атмосферы и океана*. Томск.2007. С. 158-163.
21. Тушение лесных пожаров: учебно-методическое пособие. ГБУ Архангельской области «Служба спасения». 2013. 106 с.
22. Курбатский Н. П., Костырина Т. В. Национальная система расчета пожарной опасности США // *Обнаружение и анализ лесных пожаров / ИЛИД СО АН СССР*. Красноярск, 1977. С. 38—90.
23. Курбатский Н. П. Терминология лесной пирологии // *Вопросы лесной пирологии / ИЛИД СО АН СССР*. Красноярск, 1972. С. 171—231.
24. Федеральный закон Российской Федерации от 06.05.2011 г. № 100 «О добровольной пожарной охране».
25. Sayaka Suzukia, Samuel L. Manzellob, Initial study on thatched roofing assembly ignition vulnerabilities to firebrand showers // *Fire Safety Journal* – 2019 – Science 103 – 34-37.
26. Валендик Э.Н., Кисильхов Е.К., Верховец С.В. Пожарная опасность на вырубках в темнохвойных лесах Красноярского края // *Лесное хозяйство*. 2003. № 3. С. 36—38.
27. Шешуков М.А., Нешатаев В. В., Найкруг И. Б. Некоторые принципы составления планов противопожарного устройства // *Лесное хозяйство*. 1973. № 6. С. 48—53.
28. Волокитина А.В., Ноженкова Л.Ф., Софронов М.А., Назимова Д.И. Прогноз чрезвычайных ситуаций при пожарах растительности вблизи населенных пунктов //

Сопряженные задачи механики и экологии: Мат-лы международной конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 39—48.

29. Курбатский Н.П. Терминология лесной пиронологии // Вопросы лесной пиронологии / ИЛИД СО АН СССР. Красноярск, 1972. С. 171—231.

30. Кац А.Л., Гусев В.Л., Шабунина Т.А. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. – М.: Гидрометеиздат, 1975. – 16 с.

31. Гришин А.М, Голованов А.Н, Катаева Л.Ю, Лобода Е.Л Постановка и решение задачи о сушке лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. – 2001 – т.37, №1 – с.65-76

32. Лобода Е.Л Экспериментальное исследование сушки слоя лесных горючих материалов в аэродинамической трубе // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 4-й международной конференции,– Иркутск, 2001. – с. 117-120

33. Гришин А.М, Голованов А.Н, Долгов А.А, Лобода Е.Л, Барановский Н.В., Русаков С.В. Экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2002. — Т. 305, вып. 2 – с. 31-43.

34. А. М. Гришин [и др.]. Экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305, вып. 2 : труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Томск, 24-25 октября 2001. С. 31-43.

35. N.V. Baranovskiy, V.A. Kirienko. Forest Fuel Drying, Pyrolysis and Ignition Processes during Forest Fire: A Review // Processes. 2022. Vol. 10(1). 89.

36. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пиронологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 205 с.

37. McAllister S, Grenfell I, Hadlow A, Jolly WM, Finney M, Cohen J. Piloted ignition of live forest fuels. Fire Safety J. 2012. Vol.56. P. 33–42.

38. Biagini E, Tognotti L. A generalized procedure for the devolatilization of biomass fuels based on the chemical components. Energy Fuel 2014. Vol. 28. P. 14–23.

39. Amini E, Safdari MS, DeYoung JT, Weise DT, Fletcher TH. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States. Fuel 2019. Vol. 14. P.75– 91.

40. Safdari MS. Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation. Dissertation, Chemical Engineering Department. Brigham Young University; 2018. P. 176.
41. Safdari MS, Diitenberger M, Weise DR, Fletcher TH. Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States. *Fuel* 2018. Vol. 29. P. 51–66.
42. Решетников А.А., Красновских М.П., Рогожникова (Гарпинич) К.Н., Мокрушин И. Г. Пиролиз обработанной огнезащитными составами древесины погонажных изделий // *Вестник Пермского университета* – Т.10 – В. 3 – 2020 – с. 285-299.
43. Палецкий А.А., Гончикжапов М.Б., Коробейничев О.П. Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // *СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАССИБ* – Н.1 – 2011 – с.97-98.
44. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Ю. С. Чистов, В.С. Гасилов. Критерий зажигания твердых топлив // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. 116-119 с.
45. N.V. Baranovskiy, V.A. Kirienko. Mathematical Simulation of Forest Fuel Pyrolysis and Crown Forest Fire Impact for Forest Fire Danger and Risk assessment // *Processes*. 2022. Vol. 10(3). 483.
46. N.V. Baranovskiy, V.A. Kirienko. Mathematical Simulation of Forest Fuel Pyrolysis in One-Dimensional Statement Taking into Account Soot Formation // *Processes*. 2021. Vol. 9(9). 1616.
47. Plummer F. G. Lightning in relation to forest fires // *Bulletin 111. USDA Forest Service*. Washington, DC: Government Printing Office, 1912. 39 p.
48. S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material // *Journal of the Energy Institute* –Vol.93 – 2020 – P. 1978-1992.
49. Акчина С.С., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания лесных горючих материалов лучистым тепловым потоком в многоярусном массиве // *сборник статей* – 2019 – с. 29-37.
50. D.O. Glushkov, A.G. Kosintsev, G.V. Kuznetsov, V.S. Vysokomorny Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle // *Fuel* – Vol.291 – 2021.
51. Kotoyori, T., Critical Ignition Temperatures of Wood Sawdusts, pp. 463-471 in *Fire Safety Science — Proc.1st Intl. Symp., Hemisphere, Washington (1986)*.

52. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 187 с.
53. Baranovskiy, Nikolay Viktorovich. Deterministic–Probabilistic Prediction of Forest Fires from Lightning Activity Taking into Account Aerosol Emissions / N. V. Baranovskiy, V. A. Vyatkina, A. M. Chernyshov // Atmosphere . — 2023 . — Vol. 14 iss. 1 . — [29, 22 p.].
54. Bergman, Ö., Thermal Degradation and Spontaneous Ignition in Outdoor Chip Storage, Svensk Papperstidning 77:18, 681-684 (1974).
55. Федеральный закон Российской Федерации от 06.05.2011 г. № 100 «О добровольной пожарной охране».
56. Mateus dos Reis, Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça, Aurora Miho Yanai, Camila Julia Pacheco Ramos, Philip Martin Fearnside Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics // Journal of Environmental Management – Vol.288 – 2021.
57. N.V. Baranovskiy, A.O. Malinin. Physical and Chemical Macroscopic Processes in Wooden Construction Materials of Buildings during WUI Fires: Recent and Advanced Developments // Processes. 2022. Vol. 10(2). 263.
58. Daiju Narita, Tuyara Gavrilyeva, Aleksandr Isaev Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // Polar Science – Vol.27 – 2021.
59. Седнев В. А., Тетерина Н. В. ЗАЩИТА НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация – Н.2 – 2016 – с.14-18.
60. Седнев В.А. Лопухова Н.В. Мероприятия по недопущению воздействия лесных пожаров на сельский населенный пункт // ГРАЖДАНСКАЯ ОБОРОНА НА СТРАЖЕ МИРА И БЕЗОПАСНОСТИ – 2020 – с.141-147.
61. Chris Lautenberger, Carlos Fernandez-Pello Generalized pyrolysis model for combustible solids // Fire Safety Journal. 2007. Vol. 10. P. 352.
62. Mfoniso Asuquo Enoch, Uzoma Chinenye Okeke, Needam Yiinu Narinua Identification and modelling of forest fire severity and risk zones in the Cross – Niger transition forest with remotely sensed satellite data // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2021. Vol. 24. P. 879-887.
63. Chen Q. Study On Forest Fire Spreading Model Based On Remote Sensing And GIS // 1st International Conference on Environment Prevention and Pollution Control Technology (EPPCT). 2018. P. 1-8.

64. Fatih Sivrikaya, Omer " Küçük Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region // *Ecological Informatics*. 2022. Vol. 68.
65. Глаголев В.А., Баженов Р.И. Пространственный прогноз пожарной опасности растительности по метеорологическим условиям // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. 1-9 с.
66. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов / Рослесхоз.– М.: Рослесхоз, 2011 – 131 с.
67. В.А. Перминов, К.О. Фрянова. Математическое моделирование возникновения и распространения лесных пожаров и их воздействие на здания и сооружения // *Вестник Карагандинского университета – Серия «Физика» – № 3 – 2020*.
68. Коржова А. Ю. , Перминов В.А. Математическое моделирование воздействия лесных пожаров на здания и сооружения // *Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения» – Секция 1: Экологические основы прогрессивных технологий*.
69. Yankovich, Elena Petrovna. Dynamics of Forest Vegetation in an Urban Agglomeration Based on Landsat Remote Sensing Data for the Period 1990–2022: A Case Study / E. P. Yankovich, K. S. Yankovich, N. V. Baranovskiy // *Remote Sensing* . — 2023 . — Vol. 15, iss. 7.
70. А.Ю. Коржова. Математическое моделирование распространения фронта верхового лесного пожара // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР – № 1-2 – С. 212-215 – 2019*.
71. Барановский Н.В., Малинин А.О. «Математическое моделирование теплового воздействия от фронта лесного пожара на деревянное здание в трехмерной постановке // *Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады / VII Всероссийская конференция – 2020*.
72. П.И. Тарасов. Легкая железная дорога как основа развитию транспортной инфраструктуры северных территорий России // *Горная Промышленность – №5 – 2020*.
73. Nikol Kotalova, Lenka Michalcova, David Rehak, Klaudia Kralova Sharing and providing information to protect soft targets in the railway infrastructure // *Transportation research procedia – Vol. 55 – 2021. – P. 1759-1766*.
74. Roman Lagerev, Sergey Lagerev Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone // *Transportation research procedia – Vol. 57 – 2021. – P. 332-340*.

75. Andrej Matejov, Janka Šestáková The Experiences with utilization of BIM in railway infrastructure in Slovak Republic and Czech Republic // Transportation research procedia – Vol. 55 – 2021. – P. 1139-1146.
76. Vakulenko S.P., Kurenkov P.V., Chebotareva E.A., Solop I. A., Kuzina E.L., Vasilenko M.A., Barashyan V.Y., Astafyev A.V., Nadolinsky P.V., Gasparik J. Influence of innovative elements of railway infrastructure complex on the technology of the transport processing // Transportation research procedia – Vol. 55 – 2021. – P. 342-347.
77. Vitaly Sergeev, Igor Ilin, Alexey Fadeev Transport and Logistics Infrastructure of the Arctic Zone of Russia // Transportation research procedia – Vol. 54 – 2021. – P. 936-944.
78. Kai Liu, Ming Wang, Tianjun Zhou Increasing costs to Chinese railway infrastructure by extreme precipitation in a warmer world // Transportation Research Part D – Vol. 93 – 2021. – P. 1-13.
79. Zhujun Chen, Mingkun Jiang, Lingfei Qi, Wu Wei, Ziyi Yu, Wendong Wei, Xinhai Yu, Jinyue Yan Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation // Resources, Conservation & Recycling – Vol. 178 – 2021. – P. 1-12.
80. Baranovskiy N., Malinin A., Mathematical Simulation of Forest Fire Impact on Industrial Facilities and Wood-Based Buildings – Tomsk. 2020.
81. Термоизол.com [Электронный ресурс]. URL: <https://termoizol.com/polnaya-tablitsa-teploprovodnosti-razlitchnh-stroitelynh-materialov.html> (дата обращения 12.05.2021).
82. N.V. Baranovskiy, A.O. Malinin. Mathematical Simulation of Heat Transfer in the Structures of a Passenger Carriage Under the Influence of Forest Fires // International Review on Modelling and Simulation this link is disabled. 2021. Vol. 14(4), P. 231–241.
83. Леруа Мерлен в Новосибирске [Электронный ресурс]. <https://novosibirsk.leroymerlin.ru/product/blok-haus-hvoya-28h146h3000-mm-sort-optima-3-sht-1-31-m-81947969/#nav-characteristics> URL: (дата обращения 12.05.2021).
84. Утепли ВСЕ [Электронный ресурс]. URL: <https://утепливсе.рф/stat/1428075110.html#:~:text=Характеристика%20ПТЭ-100%3A%20Плотность%3A%2084%20,-120%20до%20%2B700%20С.%20Упаковка%20ПТЭ-100%3A> (дата обращения 12.05.2021).
85. Теплосопrotивление стеклопакетов и расчет окон [Электронный ресурс]. URL: <https://www.project-house.by/win#:~:text=Стандартное%20оконное%20стекло%20имеет%20коэффициент,значения%20при%20расчёте%20величины%20теплосопrotивления> дата обращения 10.01.2022).

86. Л. І. Чумак, к. т. н., доц., О. В. Волох, магістр МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВАРІННЯ СКЛА У ВАННІЙ СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ // Вісник ПДАБА – 2013. – № 8 – С. 32-38.
87. Туричин Г.А., Лопота В.А., Абдурахманов А.А., Сысоев В.К. Математическое моделирование нагрева и испарения кварцевого стекла при лазерном синтезе нанопорошков // Физика и химия обработки материалов – 2006. – с. 49-54.
88. Фото.сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://photosight.ru/photos/6603639/> (дата обращения 12.05.2021).
89. Radeloff, V.C.; Hammer, R.B.; Stewart, S.I.; Fried, J.S.; Holcomb, S.S.; McKeefry, A.J. The wildland-urban interface in the United States. *Ecol. Appl.* 2005, 15, 799–805.
90. Sturtevant, B.R.; Cleland, D.T. Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. *Int. J. Wildland Fire* 2007, 16, 398–413.
91. Syphard, A.D.; Radeloff, V.C.; Keely, J.E.; Hawbaker, T.J.; Clayton, M.K.; Stewart, S.I.; Hammer, R.B. Human influence on California fire regimes. *Ecol. Appl.* 2007, 17, 1388–1402.
92. Arno, S.F.; Brown, J.K. Managing fire in our forests—Time for a new alternative. *J. For.* 1989, 87, 44–46.
93. Bevers, M.; Omi, P.N.; Hof, J. Random location of fuel treatments in wildland community interfaces: A percolation approach. *Can. J. For. Res.* 2004, 34, 164–173.
94. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ. 2007. С. 8-73.
95. СанПиН 2.2.2.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
96. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”.
97. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
98. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
99. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
100. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
101. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
102. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

103. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
104. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха.
105. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
106. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
107. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры.
108. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Раздел ВКР на иностранном языке

Mathematical modeling of the effect of convective heat flow from the front of a forest fire on railway infrastructure facilities taking into account structural heterogeneity

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ14	Мязина Софья Андреевна		01.03.2023

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Барановский Николай Викторович	к.э.н.		01.03.2023

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		01.03.2023

The object of the study is the elements of the infrastructure railway facility.

The aim of the work is to calculate the impact of the forest fire on the elements of the infrastructure railway facility to assess and predict the environmental impacts of forest fires.

In the course of the study the heat and mass transfer process parameters in heterogeneous infrastructure railway facility were calculated.

As a result of the study, the temperature distributions in the layers of the infrastructure railway facility under the influence of convective heat flow from the forest fire front were obtained, which allows to estimate the degree of thermal damage and to predict the environmental consequences of forest fires.

Fire is one of the most significant threats to forests and their biodiversity.

According to the European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Arctic fires emitted a record 244 million tons of carbon dioxide into the atmosphere in 2020. This number is one-third higher than in 2019 [1].

According to the report of the FBU «Aviation Forest Protection» in the period from January 1 to December 8, 2020, the total area of the forest land in Russia, passed by fire, reached 9.3 million hectares [1].

Information and statistics on forest fires, especially the grass-roots ones, including the impact of fire on soil layers are presented with large gaps in the statistical community. More comprehensive monitoring using modern fire locating and tracking systems is needed to identify fire hotspots and their consequences. Some information on forest fires is concealed by various organizations for selfish purposes.

Therefore, for a more complete and accurate study of the impact of fire on the infrastructure railway facility we use mathematical modeling and develop a calculation model of this experience.

Forest fires are considered one of the most common hazards in the forest landscape. They pose a serious threat to the forest, its flora and fauna.

Unplanned and sudden forest fires are the main cause of forest degradation, while controlled fires to manage and contain the spread of unwanted forest fires serve to improve forest condition. There are several both tangible and intangible losses from forest fires and they pose an environmental threat to the affected area [1]. The most important actions to prevent and control forest fires are:

- Identification of fire-hazardous areas and their mapping.
- Collection of data on forest fire damage.
- Development and installation of forest risk assessment tools.
- Development and implementation of forest fire forecasting systems.

- Activities related to forest protection must be included in the planned activities to ensure budget allocation.

- Preventive measures must be taken well in advance of the start of the fire season (i.e. summer).

- Appointment of an officer to coordinate with various agencies on forest fire related issues.

- "Firefighting Committee" to be established at each level, namely village/city, district to monitor as well as control the fire. They should be provided with sufficient resources to fight fires.

- A communication network should be established to ensure the timely flow of information, manpower and materials to the fire sites.

- Committees must be trained and engaged to fight and manage forest fires. In particular, people living near forests should be an integral part of such committees.

- Regular training should be organized for forestry officials and other members of the fire protection committee to inform participants about new information and tools for protecting forests from fires.

- There is a need to raise public awareness of protecting forests from fires.

- Strict legal measures must be taken to prevent forest fires. [1-2].

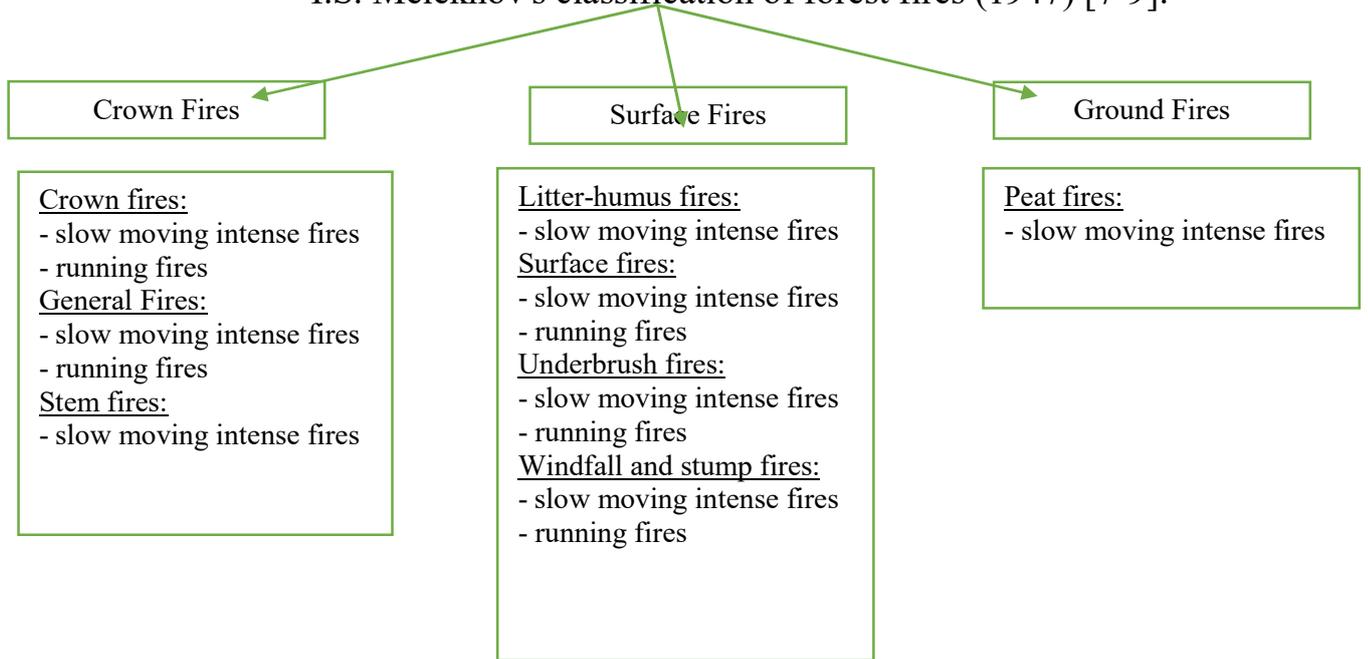
Uncontrolled combustion can cause enormous damage to the lives and health of citizens, as well as to the interests of society and the state. This natural disaster can be preceded by a number of prerequisites which are reinforced by various technical, organizational and economic factors. The key factors and prerequisites can include terrain, type of forest area, humidity, wind, weather conditions, etc. [3-6].

The sources of forest fires can be of natural or anthropogenic origin. It is worth noting that more than 90% of fires are caused by human activities.

It is very important to understand the relationship between the main environmental factors and the spatial behavior of forest fires in order to develop effective forest fire management plans [1].

The most complete classification of forest fires, which has existed for more than seven decades, was proposed by I.S. Melekhov in 1947 (Figure A.1) [7].

I.S. Melekhov's classification of forest fires (1947) [7-9]:



Forest combustible materials are classified as follows:

Table A.1 - Types and characteristics of forest combustibles [10-11]

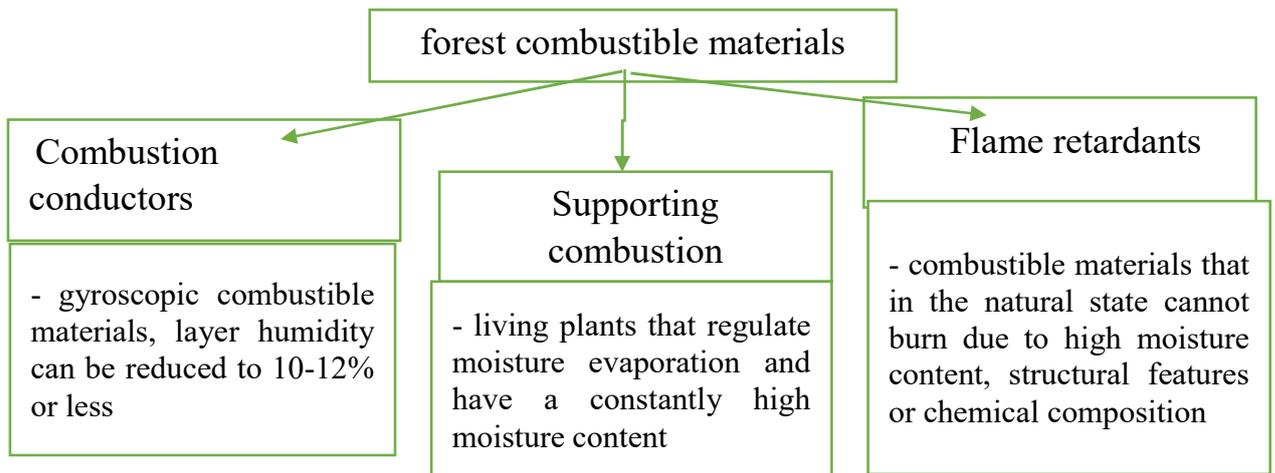
Forest combustibles		Characteristics
Soil combustibles		
	Peat	<p>Peat is divided according to the different composition of the plants. Also, the type of peat can be influenced by the composition of the mineral soil and bedrock, under the peat bog and on the soil adjacent to the peat bog [12].</p> <p>The degree of temperature is influenced by chemical characteristics</p> <p>The physical properties vary depending on the type of peat and environmental conditions.</p> <p>The specific gravity is about $1,48-2,25 \frac{g}{cm^3}$</p> <p>The bulk density is $0,07-0,62 \frac{g}{cm^3}$</p> <p>Total porosity is 74,2 - 95,3%</p> <p>Ash content 2,2 - 72,6%</p>
Ground combustibles		
	Litter fall, ground cover, small shrubs	<p>Shrubs and grasses are characteristic of unforested areas.</p> <p>More often they are located in areas after fires and clearcuts [13].</p> <p>Over time, litter fall turns into surface humus which is the top layer of soil consisting of dead parts of plants.</p>
Combustible material in the crowns of young conifers		
	Pine and cedar undergrowth	<p>Common pine has dense, rigid, curved needles. They live up to 3 years on the branches, but in good conditions they can last up to 8 years.</p> <p>The needles are highly flammable because they accumulate a lot of essential oils and resin, which are good combustibles.</p>

All information about forest combustible material reserves is plotted on maps of plant combustible materials [14-16]. With their help, it is possible to estimate the fire danger class of a given biogeocenosis and to predict forest fires [17].

In order to implement a system for predicting forest fire danger, it is important to study the drying process of forest combustible materials.

Drying is one of the methods of reducing the humidity of wood, carried out by the supply of heated air to the wood. Wood biomass is heterogeneous in size and has high humidity [13].

Classification of forest combustible materials [15]



The sources of forest fires can be natural or anthropogenic origin. It is worth noting that more than 90% of fires are caused by human activities.

Forest ecosystems perform several functions necessary to maintain the integrity of the planet's ecosystem. Thus, forest fires pose a significant danger to all living things. Fighting forest fires is a priority for modern society. Forest fire forecasting is one of the most effective ways of solving this urgent problem. In order to improve the quality of forecasting, it is necessary to develop modern forecasting systems, so it is necessary to generalize knowledge about the processes occurring during the fire [18].

The analyzed studies show that the processes of drying and pyrolysis largely determine the further ignition of forest fuels, as well as make a significant contribution to solving the problem of combating forest fires. The results obtained can be applied both in prediction systems and in the development of fire extinguishing methods [18].

In order to control various fires, it is necessary to know how the behaviour of wood changes during exposure to high temperatures [19].

During a fire, wood undergoes pyrolysis, which is a thermochemical reaction that converts wood to charcoal, condensing liquids (resin) and gases. While moisture from plants evaporates,

therefore, they are subjected to a two-stage process of thermal decomposition (pyrolysis and combustion) when exposed to high temperatures [20,21].

Pyrolysis is a physical and chemical process of thermal decomposition, which does not require the presence of oxygen; it is an effective method of utilizing wood waste. Pyrolysis products can also react with O₂ and even form flames if there is an ignition source at high temperatures [22, 23, 24].

The main cause of forest fires is the location of the area, but there are other factors that can affect them, namely: intentional arson; careless use of fire and heat (cigarettes, matches, campfires, machinery, uncontrolled burning of crops and poorly implemented prescribed fire safety rules), and lightning [25].

Forest fires pose a significant risk to the safety of the population adjacent to wilderness areas, known as the wildland-urban interface (WUI).

Work is underway worldwide to develop effective methods for predicting forest fires effects on the environment, the rate and direction of spread and impact on various infrastructure facilities near the wildland-urban interface (WUI) [26].

A fire in a rural or urban area is an event which has high consequences due to the gradual occurrence of fires in dwellings, especially in rural areas where houses are located close to each other [27].

Forest fires pose a serious ecological hazard in the forest ecosystem, which can be studied using remote sensing and geographic integrated systems (GIS). Computer modeling, a study in the field of forest fire forecasting, plays an important role and is a promising direction [28]. GIS technology is used for monitoring, as well as for identifying fires. The principle of operation is based on the preservation and efficient extraction of spatial information.

Today, mathematical modeling methods are widely used in the study of emergency processes. Forest fires are destructive to the natural landscape, flora and fauna, and have a direct dependence on meteorological conditions and fuel availability.

During the spread of forest fires the following modeling tasks can be distinguished:

- predicting the spread of forest fires in an area;
- manual setting of the initial fire area using a model in accordance with the images of the fire area received from aviation and satellites;
- supporting firefighting units in creating forest fires isolation zones;
- calculation of evacuation routes for people during a fire;
- reducing the cost, manpower and means of extinguishing;
- environmental forecast after fires.

The distance from the flames to the nearest place, the time of extinguishing, as well as the means of extinguishing, evacuation points, possible forces and means of involvement - all this allows to determine the use of standard tools [29].

The creation of a fire hazard map consists of three stages of technology:

1. Pre-processing
2. Program calculations.
3. The results are processed using GIS. The data are displayed in various forms such as maps, tables, images, flowcharts.

The operational data on GIS changes with the frequency of one or more times a day. Due to the use of GIS, the response time in case of forest fires has increased. The use of rail transport is still popular all over the world. A new type of railway is proposed – the light railway. The proposed new mode of transport makes it possible to use the main advantages of narrow-gauge railways (speed of construction, efficiency, etc.) and eliminate their main drawback – the need for overload when switching from a narrow gauge to a conventional one, the width of 1520 mm, with a significant reduction in capital costs [30].

The Arctic region of Russia has a significant multi-factor potential. That potential should be maximized, taking into account all the characteristics of the region. An important factor is the development of transport and logistics infrastructure in the region. It is advisable to build an integrated transport and logistics model linking all modes and uses of the transport [31].

A one-room wooden house located near a forest fire was taken as a physical model. In the absence of wind, the fire front spreads at low speed. The enclosing structure of this building is represented as a single-layer slab of wood. The heat from the forest fire front is transferred to the wall by convection. The main safety parameter of a wooden structure is the fact of ignition (or non-ignition) of the enclosing structure of a wooden building when a sufficient surface temperature is reached.

The following assumptions have been made:

- There is a thermal conductivity mechanism in the enclosing structures;
- Thermophysical properties of building materials do not depend on temperature;
- There is a catastrophic fire weather scenario when there is no moisture in the surface layer of the wall;
- Wood pyrolysis is ignored;
- The main mechanism of heat transfer from the line of fire to the building is convection.

Table A.2 – Thermophysical characteristics of wood and facing materials

Material	$c, \frac{J}{kg \cdot K}$	$\rho, \frac{kg}{m^3}$	$\lambda, \frac{J}{m \cdot K}$
Pine	1670	500	0,12
Birch	2200	650	0,28
Facing cardboard	2300	100	0,18

Table A.3 - Thermal characteristics of insulation and facing materials

Material	$c, \frac{J}{kg \cdot K}$	$\rho, \frac{kg}{m^3}$	$\lambda, \frac{J}{m \cdot K}$
Asbestos board [32]	1500	1600	0,4
Siding Pine block house [33]	2700	500	0,14
Basalt thermal insulation PTE-100 [34]	840	100	0,038

Table A.4 – Thermal physical characteristics of different types of fires

Type of fire	T, K	$\alpha, \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Firestorm	1200	200
Crown fire	1100	150
Surface fire of high intensity	1000	110
Surface fire of low intensity	900	80

Table A.5 - Thermal physical characteristics of wood and facing materials [35]

Material	$c, \frac{J}{kg \cdot K}$	$\rho, \frac{kg}{m^3}$	$\lambda, \frac{J}{m \cdot K}$
Glass	703	2500	0,76

When heated, the glass softens and is known to acquire the ability to flow, forming bulges. The object of the study is the element of an infrastructure railway facility. The wall of the railway infrastructure facility is a two-layer model - wood and external coating. The subject of the study can be defined as the heat transfer in the two-layer structure of a wooden building under the influence of heat flow from the front of the various types of fire.

Every year, forest fires affect a large number of both individual residential buildings and entire settlements, especially in places where buildings are integrated into the forest [36]. For these regions, a significant hazard is the risk of forest fires, which can be caused by both natural and man-made factors [37].

The classification of forest land [37]:

1. Wilderness areas inaccessible to humans; the risk of fire due to man-made causes is minimal. Monitoring the condition of forest plantations can be applied to forest fire management. Such measures can help manage forest fires and reduce the frequency of future fires.

2. The main directions of forest management, including more accessible forest areas, as well as areas with commercial timber.

3. Residential areas are areas where the boundaries of houses are contiguous with the boundaries of the forest. As a rule, the control of forest plantations is aimed at protecting places of mass settlement and infrastructure.

The second and third zones can further be divided into three risk reduction groups [38]:

- Individual apartments and adjacent land.
- Boundaries between settlements and wild vegetation.
- Wild vegetation between settlements.

For the purposes of mathematical modeling, the walls of a wooden building can be simplified as a layered structure, which is affected by the heat flow from a forest fire front. Since the wall of a wooden house consists of two main layers – wood and thermal insulation / cladding material, as well as a glass opening, then let us consider a two-dimensional two-layer model of a wooden structure (Fig. 46) as an ideal model, in which heat is transmitted by thermal conductivity.

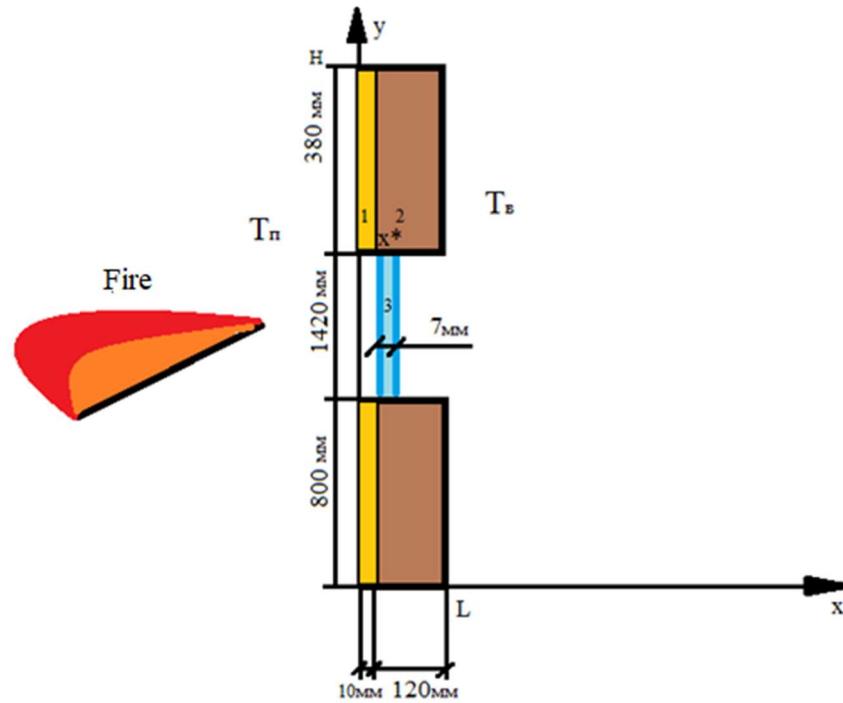


Figure A.3 - Geometric formulation of the problem

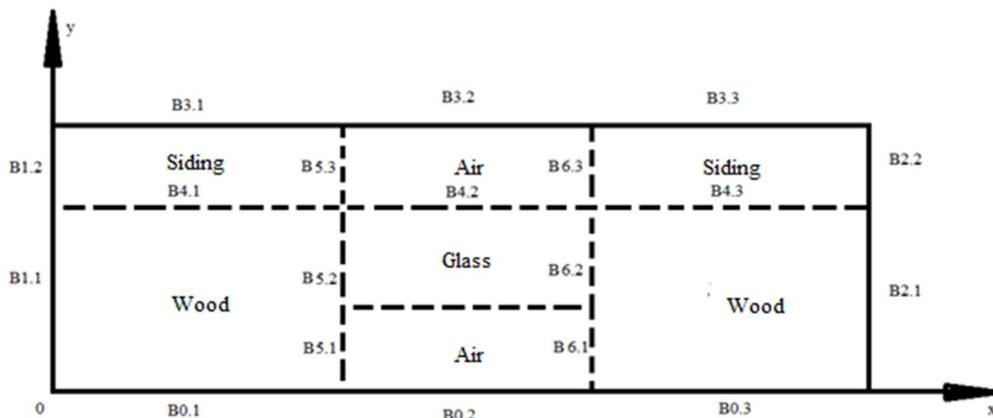


Figure A.4 - Diagram of the solution area

Conclusion

1) Annually, in the spring and summer period, our country is struggling with a huge disaster - large areas are covered by fire. Forest fires reach rural areas, which leads to such consequences as injury to health; destruction of housing; deterioration of drinking water quality; air pollution; loss of soil fertility; death of animals.

2) In our country, forest fires are classified according to different characteristics: by the number of areas covered, levels of complexity, and the way the flames spread.

3) The drying process is an important step in solving the problem of forest fires. The ignition of forest combustible material (FCM) is directly related to moisture content. This relationship can be used to estimate the fire hazard.

4) Over the past 10 years, a large number of mathematical models of forest fires have been created. Mathematical modeling is a promising direction in the field of forest fire forecasting, which does not require the cost of carrying out an activity in contrast to conducting experimental studies. Most of the research is based on the post-fire period.

5) Recently, a large number of scientific developments have been used for fire forecasting. For example, GIS technologies, which have proven to be successful in their application.

6) Fires cause enormous damage not only to the economy but also to the ecosystem. The ecosystem is being destroyed and the diversity of plant species is reduced.

List of literature

1. Manoj Kumar, Sweta Nisha Phukon, HukumSingh Forest Resources Resilience and Conflicts / The role of communities in sustainable land and forest management – 2021 – C. 24 – P. 305-318.
2. Kurbatovsky N.P. Terminology of forest pyrology // Questions of forest pyrology / ILiD SB of the USSR Academy of Sciences. Krasnoyarsk, 1972. pp. 171-231.
3. Fire safety. encyclopedia. - M.: FSU VNIPO EMERCOM of Russia, 2007. – 416 p.
4. Gusev V.G., Lopukhova E.L., Dubovy V.K. Classification and general properties of forest combustible materials // Izvestiya vuzov. Forest Journal. – 2012. – No. 1. – pp. 134-145.
5. Mikhalev Yu.A. Types of probable forest fires on the lands of the Siberian forest fund, methods of their assessment // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. - 2014. – No. 10. – pp. 132-137.
6. Khodakov V.E., Zharikova M.V. Forest fires: research methods monograph. – Kherson: Grin D.S., 2011, – 417 p.
7. Valendik E.N., Kisilyakhov E.K., Verkhovets S.V. Fire danger at cuttings in dark coniferous forests of the Krasnoyarsk Territory // Forestry. 2003. No. 3. pp. 36-38.
8. Scott, J. H., and Reinhardt, E. D., Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior (Research Paper RMRS-RP-29), Rocky Mountain Research Station, US Forest Service, Fort Collins CO (2001).
9. Chernykh V. L., Sysuev V. V. Information technologies in forestry: textbook / Min. education of the Russian Federation; Mari State Technical University. university. Yoshkar-Ola, 2000. 377 p.
10. Kurbatsky N. P., Kostyrina T. V. National fire hazard calculation system of the USA // Detection and analysis of forest fires / ILiD SB AS USSR. Krasnoyarsk, 1977. pp. 38-90.
11. Kurbatovsky N. P. Terminology of forest pyrology // questions of forest pyrology / ILiD SB of the USSR Academy of Sciences. Krasnoyarsk, 1972. pp. 171-231.
12. Federal Law of the Russian Federation No. 100 of 06.05.2011 "On Voluntary fire protection".
13. Sayaka Suzukia, Samuel L. Manzellob, Initial study on thatched roofing assembly ignition vulnerabilities to firebrand showers // Fire Safety Journal – 2019 – Science 103 – 34-37.
14. Valendik E.N., Kisilyakhov E.K., Verkhovets S.V. Fire danger at cuttings in dark coniferous forests of the Krasnoyarsk Territory // Forestry. 2003. No. 3. pp. 36-38.
15. Sheshukov M.A., Neshataev V. V., Naikrug I. B. Some principles of drawing up fire-fighting device plans // Forestry. 1973. No. 6. pp. 48-53.

16. Volokitina A.V., Nozhenkova L.F., Sofronov M.A., Nazimova D.I. Forecast of emergency situations during vegetation fires near settlements // Conjugate problems of mechanics and ecology: Materials of the international conference. Tomsk: Publishing House Vol. un-ta, 2000. pp. 39-48.
17. Kurbatovsky N.P. Terminology of forest pyrology // Questions of forest pyrology / ILiD SB of the USSR Academy of Sciences. Krasnoyarsk, 1972. pp. 171-231.
18. N.V. Baranovskiy, V.A. Kirienko. Forest Fuel Drying, Pyrolysis and Ignition Processes during Forest Fire: A Review // Processes. 2022. Vol. 10(1). 89.
19. Sofronov M.A., Volokitina A.V. Pyrological zoning in the taiga zone. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1990. 205 p.
20. McAllister S, Grenfell I, Hadlow A, Jolly WM, Finney M, Cohen J. Piloted ignition of live forest fuels. Fire Safety J. 2012. Vol.56. P. 33–42.
21. Biagini E, Tognotti L. A generalized procedure for the devolatilization of biomass fuels based on the chemical components. Energy Fuel 2014. Vol. 28. P. 14–23.
22. Amini E, Safdari MS, DeYoung JT, Weise DT, Fletcher TH. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States. Fuel 2019. Vol. 14. P.75– 91.
23. Safdari MS. Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation. Dissertation, Chemical Engineering Department. Brigham Young University; 2018. P. 176.
24. Safdari MS, Diertenberger M, Weise DR, Fletcher TH. Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States. Fuel 2018. Vol. 29. P. 51–66.
25. S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material // Journal of the Energy Institute –Vol.93 – 2020 – P. 1978-1992.
26. N.V. Baranovskiy, A.O. Malinin. Physical and Chemical Macroscopic Processes in Wooden Construction Materials of Buildings during WUI Fires: Recent and Advanced Developments // Processes. 2022. Vol. 10(2). 263.
27. Daiju Narita, Tuyara Gavriilyeva, Aleksandr Isaev Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // Polar Science – Vol.27 – 2021.
28. Chen Q. Study On Forest Fire Spreading Model Based On Remote Sensing And GIS // 1st International Conference on Environment Prevention and Pollution Control Technology (EPPCT). 2018. P. 1-8.

29. Korzhova A. Yu. , Perminov V.A. Mathematical modeling of the impact of forest fires on buildings and structures // All-Russian Scientific and Practical Conference of young scientists, postgraduates and students "Ecology and safety in the Technosphere: modern problems and solutions" – Section 1: Ecological foundations of progressive technologies.

30. Roman Lagerev, Sergey Lagerev Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone // Transportation research procedia – Vol. 57 – 2021. – P. 332-340.

31. Zhujun Chen, Mingkun Jiang, Lingfei Qi, Wu Wei, Ziyi Yu, Wendong Wei, Xinhai Yu, Jinyue Yan Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation // Resources, Conservation & Recycling – Vol. 178 – 2021. – P. 1-12.

32. Insulate EVERYTHING [Electronic resource]. URL: <https://утепливсе.рф/stat/1428075110.html#:~:text=Характеристика%20ПТЭ-100%3A%20Плотность%3A%2084%20,-120%20до%20%2B700°C.%20Упаковка%20ПТЭ-100%3A> (дата обращения 12.05.2021).

33. Heat resistance of double-glazed windows and calculation of windows [Electronic resource]. URL: <https://www.project-house.by/win#:~:text=Стандартное%20оконное%20стекло%20имеет%20коэффициент,значения%20при%20расчёте%20величины%20теплосопротивления> дата обращения 10.01.2022).

34. L. I. Chumak, candidate of technical sciences, Assoc. , O. V. Volokh, master of mathematical modeling of the process of cooking glass in the bathroom of a glass – making furnace // Vestnik PDABA – 2013. – № 8-pp. 32-38.

35. Turichin G.A., Lopota V.A., Abdurakhmanov A.A., Sysoev V.K. Mathematical modeling of quartz glass heating and evaporation during laser synthesis of nanopowders // Physics and chemistry of materials processing – 2006. – pp. 49-54.

36. Radeloff, V.C.; Hammer, R.B.; Stewart, S.I.; Fried, J.S.; Holcomb, S.S.; McKeefry, A.J. The wildland-urban interface in the United States. Ecol. Appl. 2005, 15, 799–805.

37. Sturtevant, B.R.; Cleland, D.T. Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. Int. J. Wildland Fire 2007, 16, 398–413.

38. Syphard, A.D.; Radeloff, V.C.; Keely, J.E.; Hawbaker, T.J.; Clayton, M.K.; Stewart, S.I.; Hammer, R.B. Human influence on California fire regimes. Ecol. Appl. 2007, 17, 1388–1402.