МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

ФЕДОТКИН Илия Олегович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Специальность 2.10.1 – «Пожарная безопасность»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор **Скопинцева О.В.**

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ПОЖАРАМИ В ШАХТАХ 10

1.1. Анализ статистических данных по аварийности и травматизму на горнодобывающих предприятиях 10

1.2. Современные подходы к обеспечению пожарной безопасности шахт ... 25

1.3. Шахтные пожары как объект оперативной оценки и прогнозирования. 29

1.4. Анализ способов и методов тушения подземных пожаров 31

Выводы, цель и задачи исследований 35

2. ФОРМИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ 37

2.1. Обзор современных способов моделирования пожаров в шахтах 37

2.2. Физико-математическая модель пожара в горной выработке 42

2.3. Оценка сеточной чувствительности CFD-модели пожара в горной выработке 48

2.4. Валидация CFD-модели пожара в горной выработке по экспериментальным данным 53

Выводы по главе 59

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДИНАМИКУ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОЖАРАХ В ШАХТЕ 61

3.1. Факторы, влияющие на развитие пожара в шахте 61

3.2. Оценка влияния угла наклона выработки на распределение факторов пожара 63

3.3. Анализ закономерностей изменения температуры и концентрации CO в горной выработке 71

3.4. Определение сценариев развития пожаров в горных выработках для

численного моделирования 78
Выводы по главе 88
4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА 91
4.1. Постановка задачи машинного обучения и архитектура нейросетевой модели 91
4.2. Оценка точности нейросетевой модели при оперативном определении мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара 96
4.3. Обоснование возможности прогнозирования опасных факторов пожара в горной выработке с использованием нейросетевой модели 99
4.4. Исследование достаточности измерительных конфигураций для оценки и прогнозирования параметров пожара 104
4.5. Практические рекомендации по применению разработанного метода 117
Выводы по главе 121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 128
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Высокая потребность в угле приводит к увеличению его добычи в России, достигшей 440 млн т. в 2025 г. В то же время, добыча угля подземным способом связана с высоким уровнем потенциальных опасностей, реализация которых приводит к возникновению аварий, угрожающих жизни и здоровью горнорабочих, а также наносящих серьёзный экономический ущерб.

Наиболее распространенными авариями на угольных предприятиях России являются пожары и взрывы газа, угольной пыли, которые в сумме составляют около половины от общего числа аварий, причем пожары происходят чаще чем взрывы – за период с 2013 по 2023 год на их долю приходится 27,9% всех аварий. Пожары в угольных шахтах представляют большую опасность для жизни и здоровья горнорабочих из-за выделения токсичных газов, распространяющихся по вентиляционному контуру и способных поражать большие участки вентиляционной сети, кроме того, пожары могут спровоцировать взрывы выделяющихся из угольных пластов горючих газов и угольной пыли.

Развитие пожара в горной выработке определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, включая динамику роста и значения мощности тепловыделения очага, его местоположение, уклон выработки, параметры вентиляционного режима. При пожаре также возможно образование неустойчивых режимов проветривания и изменение путей распространения продуктов горения. Все это существенно усложняет оценку пожарной обстановки и повышает требования к оперативности принимаемых решений.

В аварийной ситуации, как правило, неизвестны точное положение очага, текущая и предельная мощность тепловыделения, характер развития и будущая картина распространения опасных факторов пожара, а решения по локализации пожара, управлению вентиляцией и эвакуации людей принимаются в условиях дефицита времени.

Существующие подходы к прогнозированию развития пожара имеют существенные ограничения при оперативном применении. Упрощенные расчетные зависимости дают приближенную и неполную картину пожарной обстановки, а детальное численное моделирование требует значительных временных и вычислительных затрат, а также предварительного задания исходных данных, которые в момент аварии отсутствуют либо характеризуются высокой степенью неопределенности.

Применяемые в угольных шахтах системы обнаружения пожара и контроля параметров рудничной атмосферы позволяют выявлять признаки возникновения пожара и формировать сигнал о наличии пожароопасной ситуации. Однако такие системы, опираясь на данные аэрогазового контроля, не предназначены для определения мощности очага, оценки его местоположения и прогнозирования распространения опасных факторов пожара в горной выработке. В связи с чем актуальной задачей является разработка метода оперативной оценки параметров источника и прогнозирования опасных факторов пожара в горной выработке, позволяющего повысить информативность контроля пожарной обстановки и сформировать информационную основу для принятия решений при аварии.

Целью работы является разработка метода оперативного оценивания параметров и прогнозирования опасных факторов пожара в протяженных горных выработках.

Объект исследования – пожары в протяженных горных выработках.

Предмет исследования – закономерности между параметрами пожара и наблюдаемыми значениями температуры и концентрации CO в контрольных точках выработки, а также методы их оперативной оценки и прогнозирования.

Идея работы состоит в определении текущего состояния пожара и прогнозировании его развития по доступным в реальном времени данным с использованием быстродействующей модели, обученной на широком наборе численных сценариев развития пожара в горных выработках.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

1. Задача оперативной оценки текущей мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара в горных выработках, в том числе наклонных, может быть решена методом с использованием машинного обучения, предполагающим учет значений температуры и концентрации оксида углерода, угла наклона выработки и скорости вентиляционного потока в качестве основных информативных параметров.

2. Разработанный метод, учитывающий динамику параметров рудничной атмосферы по данным ограниченной измерительной конфигурации, позволяет осуществлять оперативный прогноз опасных факторов пожара, таких как температура и концентрации оксида углерода, в заданных точках пространства выработки.

3. Рационально достаточной для совместной оперативной оценки текущей интенсивности и положения очага пожара, а также прогноза распространения опасных факторов пожара в протяженных горных выработках в рассматриваемой постановке задачи является двухточечная схема с измерением температуры и концентрации оксида углерода в каждой точке.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием общепринятых подходов к численному моделированию и положительными результатами валидации и оценки сеточной чувствительности численной модели пожара в горной выработке, а также сопоставимостью результатов численного моделирования с аналитическими оценками и опубликованными экспериментальными данными;

- постановкой вычислительных экспериментов на представительном пространстве сценариев, включающем вариацию значимых параметров в согласованных с литературными и экспериментальными данными

диапазонах, а также достаточным объёмом и разнообразием сценарного пространства;

- удовлетворительными показателями качества модели машинного обучения с применением корректных протоколов валидации, исключающих утечку информации.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ статистических данных по авариям на угольных шахтах, а также обзор современных подходов к моделированию пожаров в угольных шахтах;

2. Разработать расчетную постановку и параметризовать трехмерную численную модель пожара в наклонной горной выработке, провести верификацию полученной модели;

3. Исследовать факторы, влияющие на распространение опасных факторов пожара в горных выработках;

4. Разработать метод оперативной оценки местоположения очага пожара, текущей мощности тепловыделения и прогнозирования опасных факторов пожара по данным ограниченной измерительной конфигурации;

5. Исследовать влияние конфигурации точек и каналов измерения на точность решения задач оперативной оценки и прогноза и обосновать рационально достаточную схему наблюдения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Поставлена и решена обратная задача совместной оперативной оценки текущей мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара в горной выработке, в том числе наклонной, по данным ограниченной конфигурации точек измерения температуры и концентрации оксида углерода.

2. Разработан метод оперативного прогнозирования распространения опасных факторов пожара в горной выработке, обеспечивающий совместный прогноз температуры, концентрации оксида углерода в заданных точках пространства по динамике регистрируемых параметров рудничной

атмосферы с учетом скорости вентиляционного потока и угла наклона выработки.

3. Обоснована рационально достаточная конфигурация точек измерения параметров рудничной атмосферы, обеспечивающая совместную оценку текущих параметров и прогноз распространения опасных факторов пожара и состоящая из двух точек наблюдения, в каждой из которых измеряется температура и концентрация оксида углерода.

Практическая значимость исследования – применение разработанного метода оперативной оценки и прогнозирования параметров пожара на базе модели машинного обучения позволит обеспечить оперативное информирование персонала шахты о текущей и ожидаемой обстановке в месте возникновения пожара, что способствует принятию своевременных и обоснованных решений при возникновении, развитии и ликвидации пожаров в шахтах и позволяет минимизировать риски для жизни и здоровья горняков и спасателей.

Научное значение работы заключается в развитии методов оценки пожарной обстановки в горных выработках на основе данных аэрогазового контроля путем обоснования возможности использования пространственно-временной динамики температуры и концентрации оксида углерода для оперативной оценки местоположения и мощности очага пожара, а также прогнозирования опасных факторов пожара при ограниченной измерительной конфигурации.

Методы исследования: анализ и обобщение литературных источников, численное трехмерное моделирование процессов тепломассопереноса, формирование сценарного пространства вычислительных экспериментов, обработка и сравнительный анализ результатов моделирования, методы математической статистики и анализа данных, регрессионного анализа, методы машинного обучения.

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на XII Всероссийской научно-практической

конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, 2025 г.), Международной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, 2025г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка - 2026» (Москва, 2026 г.), а также на научных семинарах кафедры «Техносферная безопасность» (Москва, НИТУ МИСИС, 2023 – 2026 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей (в том числе 5 научных работ в изданиях, индексируемых в Scopus и 4 в рецензируемых изданиях ВАК РФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; содержит 13 таблиц, 29 рисунков и список литературы из 127 наименований.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., проф. О.В. Скопинцевой, зав. каф. «Техносферная безопасность», д.т.н., проф. Т.И. Овчинниковой, д.т.н., доц. С.В. Баловцеву и всем сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность» за содействие при выполнении работы.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ПОЖАРАМИ В ШАХТАХ

1.1. Анализ статистических данных по аварийности и травматизму на горнодобывающих предприятиях

На сегодняшний день уголь является одним из важнейших источников энергии для промышленности, энергетики и жилого сектора, который обеспечивает около 27% мирового потребления первичной энергии и 35% мирового потребления электроэнергии, оставаясь самым распространенным топливом, применяемым для её генерации. Несмотря на постепенный переход на возобновляемые источники энергии, мировое потребление угля продолжает расти – согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2023 году оно достигло нового рекорда в 8,7 млрд тонн, увеличившись на 2,6 % относительно показателя 2022 года. Особенно рост потребления угля наблюдается в Китае, где оно достигло 4883 млн тонн. в 2023 году, а также в Индии – 1251 млн тонн [1].

В 2023 году мировая добыча угля выросла на 3,1% по сравнению с 2022 годом и составила 8 970 млн тонн, что является историческим максимумом. При этом 88,3% угля добывается в шести ведущих угледобывающих странах: Китае – 4710 млн тонн (52,51 %), Индии – 1010,9 млн тонн (11,27 %), Индонезии – 775,2 млн тонн (8,64 %), США – 526,5 млн тонн (5,86 %), Австралии – 455,8 млн тонн (5,08 %) и России – 438,7 млн тонн (4,89 %) [1, 2]. Индия и Индонезия демонстрируют наибольшие темпы роста за период с 2013 по 2023 год – 78,64% и 63,33% соответственно. После падения добычи угля в 2016 году, Китай также увеличил добычу на 38,1% к 2023 году (рис. 1.1). В России за данный период рост добычи составил 24,61% и несмотря на замедление темпов после 2019 года (в период пандемии и сложной геополитической обстановки), ожидается дальнейшее увеличение добычи угля [2].

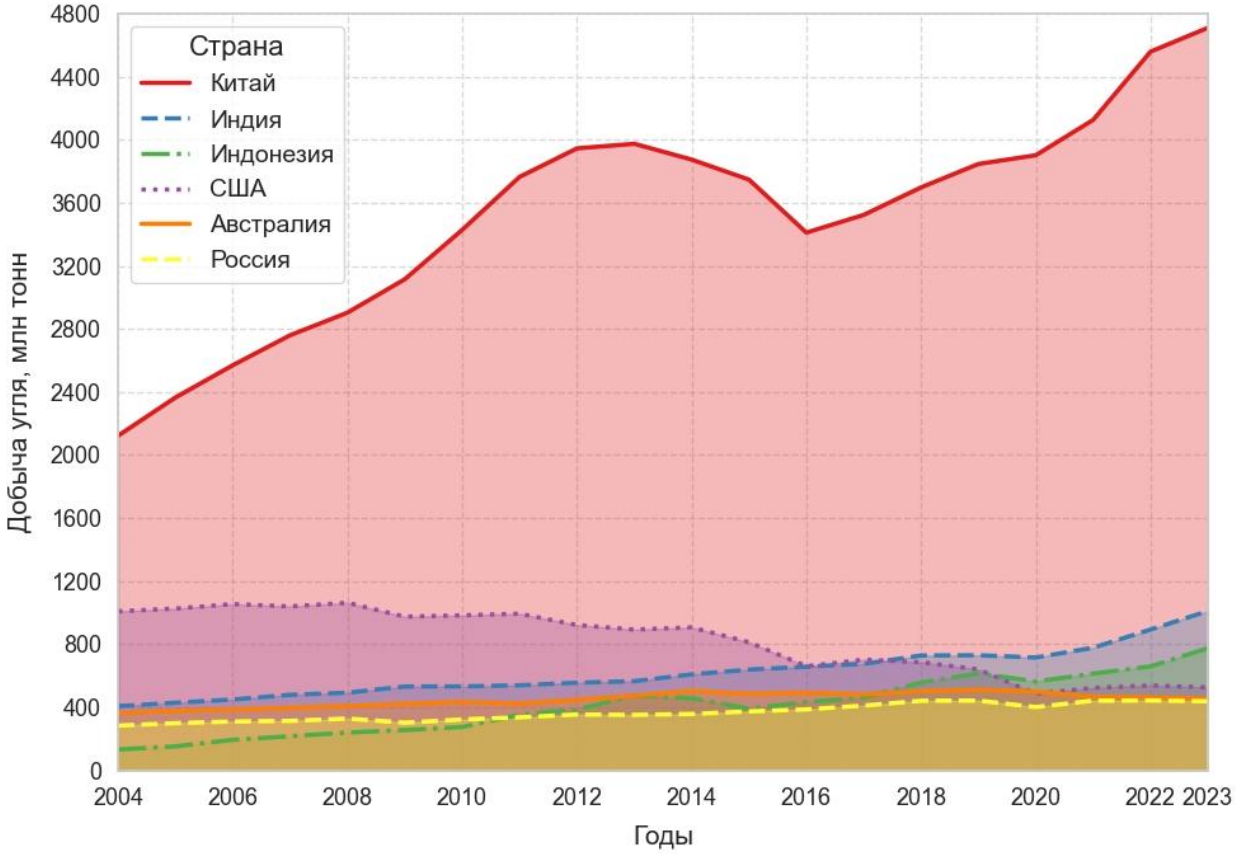

Рис. 1.1 – Динамика добычи угля ведущими угледобывающими странами в 2004-2023 гг.

Примечательно, что 75,8% мировых доказанных запасов угля, составляющих 1074 млрд тонн, располагаются в пяти странах, также лидирующих по текущим объёмам добычи угля – США, России, Австралии, Китае и Индии (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Перечень стран с крупнейшими доказанными запасами угля

№ п/п	*Страна*	*Запасы угля, млн тонн*	*Доля от мирового запаса, %*	*№ п/п*	*Страна*	*Запасы угля, млн тонн*	*Доля от мирового запаса, %*
1	США	248 941	23.2	5	Индия	105 919	10.2
2	Россия	162 166	15.1	6	Германия	35 900	3.3
3	Австралия	150 227	14.0	7	Индонезия	34 869	3.2
4	Китай	143 197	13.3	8	Польша	28 395	2.6

Сопоставление текущих темпов добычи с имеющимися запасами (рис.

1.2) демонстрирует, что страны с наиболее интенсивной добычей характеризуются относительно низкой обеспеченностью запасами. Китай, будучи крупнейшим производителем угля в мире, при сохранении текущих темпов добычи может исчерпать свои запасы уже через 30,4 года, Индонезия – через 45 лет, а Индия – через 104,8 года. В то же время страны с более умеренными темпами добычи, такие как США, Россия и Австралия, обладают значительно большими запасами угля, обеспечивающими при современных темпах добычи разработку месторождений на 472,8, 369,7 и 329,6 лет соответственно.

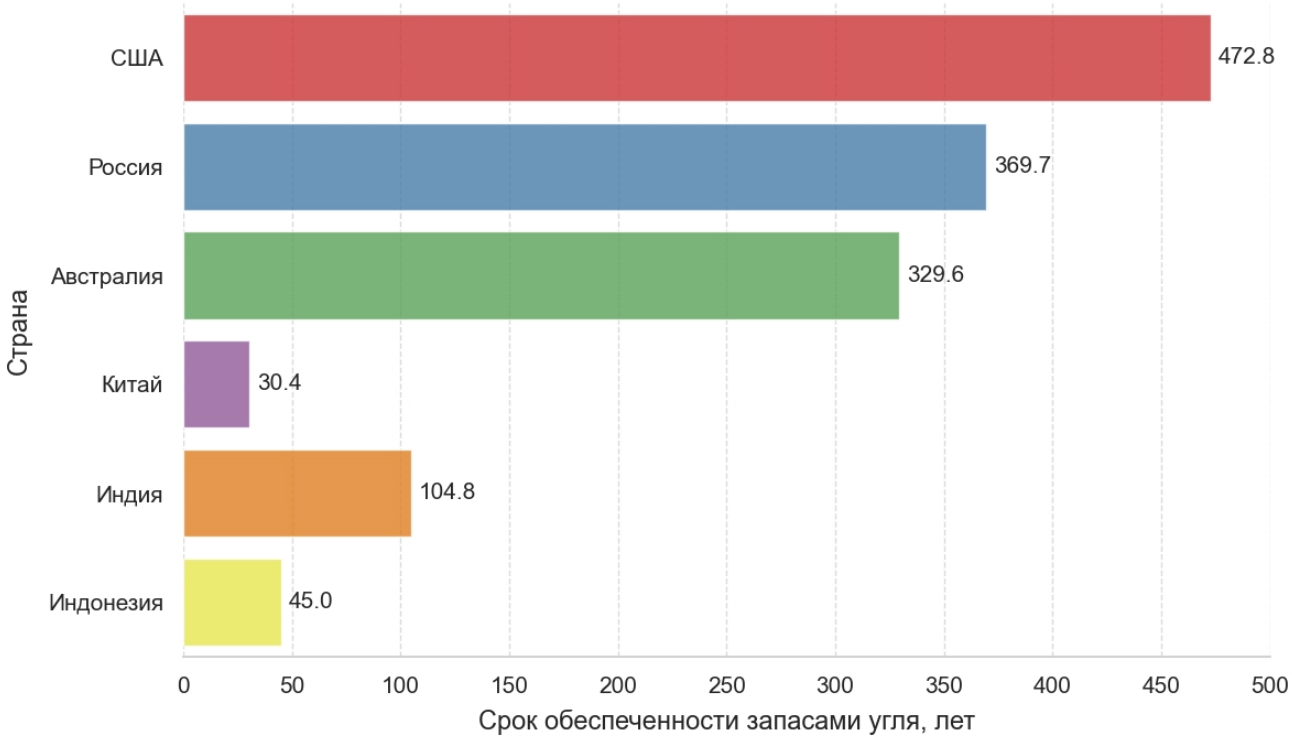

Рис. 1.2. – Обеспеченность запасами угля ведущих угледобывающих стран при текущем уровне добычи

Такое соотношение между запасами и объемами добычи в условиях устойчивого роста мирового потребления угля создает предпосылки для интенсификации горных работ в странах с большей обеспеченностью запасами, поскольку постепенное истощение ресурсной базы в таких странах как Китай и Индонезия потребует перераспределения производственных мощностей в пользу стран с более значительными запасами.

Это особенно актуально для России, где утвержденная в 2020 году программа развития угольной промышленности до 2035 г. предусматривает значительное наращивание добычи. Согласно данной программе, к 2030 году объемы добычи могут достичь 476 млн тонн при консервативном сценарии и 659 млн тонн при оптимистичном. При этом ключевыми приоритетами энергетической стратегии России до 2035 года определены обеспечение энергетической безопасности, повышение энергетической и экономической эффективности, а также устойчивое развитие энергетического сектора.

Добыча угля традиционно связана с высоким риском аварий, приводящих к травматизму и серьёзному экономическому ущербу. При наблюдающемся росте угледобычи и интенсификации горных работ важно уделять особое внимание вопросам безопасности и искать способы снижения аварийности для сохранения жизни и здоровья людей и минимизации материального ущерба. Анализ аварийности и применяемых мер по обеспечению безопасности на угледобывающих предприятиях стран-лидеров по добыче угля может послужить важным источником информации, необходимым для дальнейшего повышения безопасности на угольных шахтах в различных странах, в том числе и в России.

За период с 2013 по 2023 год в Китае, Индии, России и США в результате горных работ по добыче угля погибло в общей сложности 3843 человека, что делает угледобывающую отрасль одной из самых опасных. Однако, как видно из рисунка 1.3, за данный период наблюдается общемировая тенденция к снижению количества смертельных случаев в угледобывающей отрасли. Наибольшую динамику снижения смертельного травматизма демонстрирует Китай, где количество смертельно травмированных сократилось с 467 чел. в 2013 году до 176 чел. в 2023 году (снижение на 62,3%) [1]. При этом среднегодовой показатель в КНР (259,7 чел.) значительно превосходит аналогичные значения других стран, что может объясняться масштабами добычи. Стоит отметить, что для Китая также характерны периодические всплески количества смертельно

травмированных, такие как в 2016 году (289 чел.) и 2019 году (299 чел.) [1].

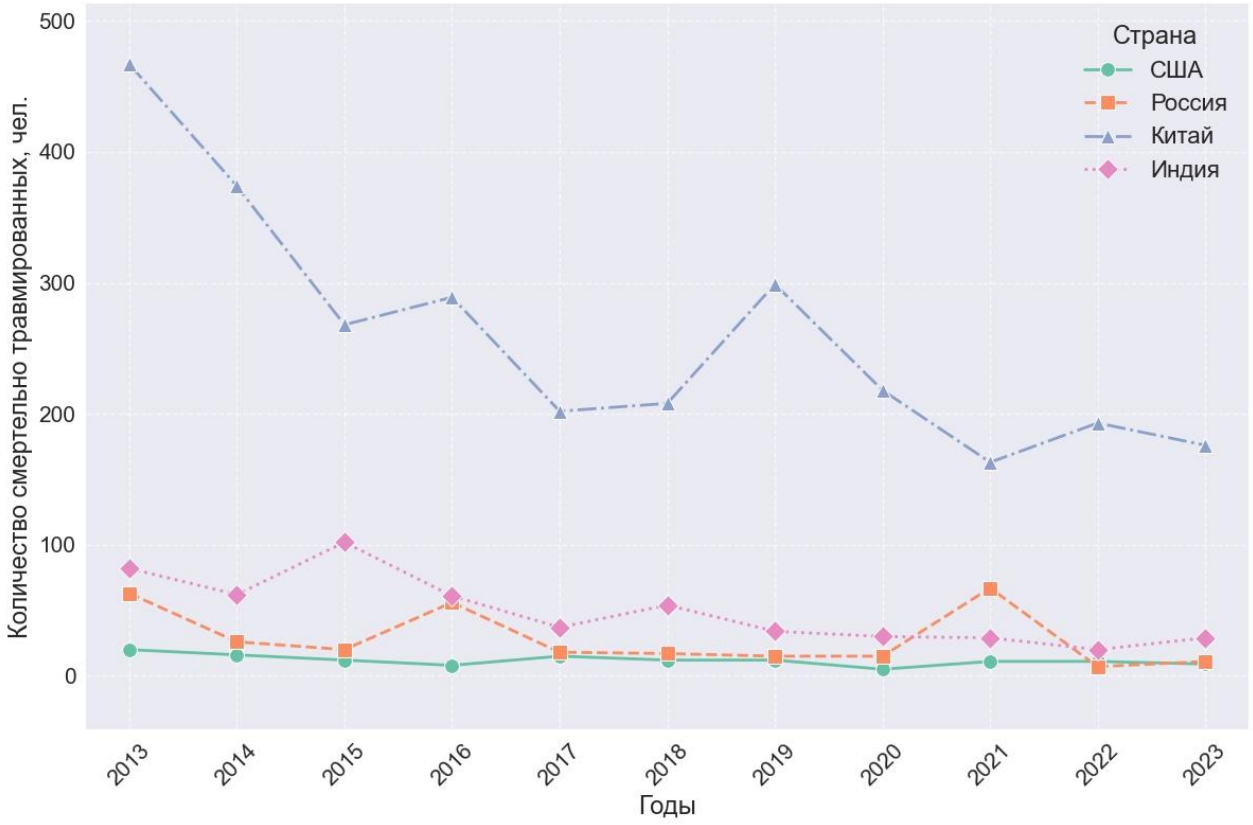

Рис. 1.3. – Динамика количества смертельно травмированных при добыче угля по странам в 2013-2023 гг.

Угледобывающая отрасль США характеризуется наиболее стабильными показателями со средним значением 11,9 смертельно травмированных в год и планомерным снижением с 20 до 9 человек за рассматриваемый период, что хорошо коррелирует со снижением добычи угля за этот период с 893,4 до 526,5 млн тонн (коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,8).

Российская статистика отличается существенными колебаниями смертельного травматизма: от минимума в 7 чел. (2022 г.) до максимумов в 63 и 67 чел. (2013 и 2021 гг. соответственно). В Индии прослеживается устойчивое улучшение ситуации: количество смертельно травмированных сократилось с 82 до 29 (снижение на 64,6%).

Для того, чтобы получить более объективную картину, нивелировав различия в масштабах производства между странами, используется удельный

показатель смертельного травматизма, который определяется как количество смертельно травмированных работников на 1 млн тонн добытого угля. США демонстрирует (рис. 1.4) наиболее низкие и стабильные значения удельного показателя смертельного травматизма (среднее значение 0,017 чел./млн тонн, что в 3-5 раз ниже, чем у других рассматриваемых стран).

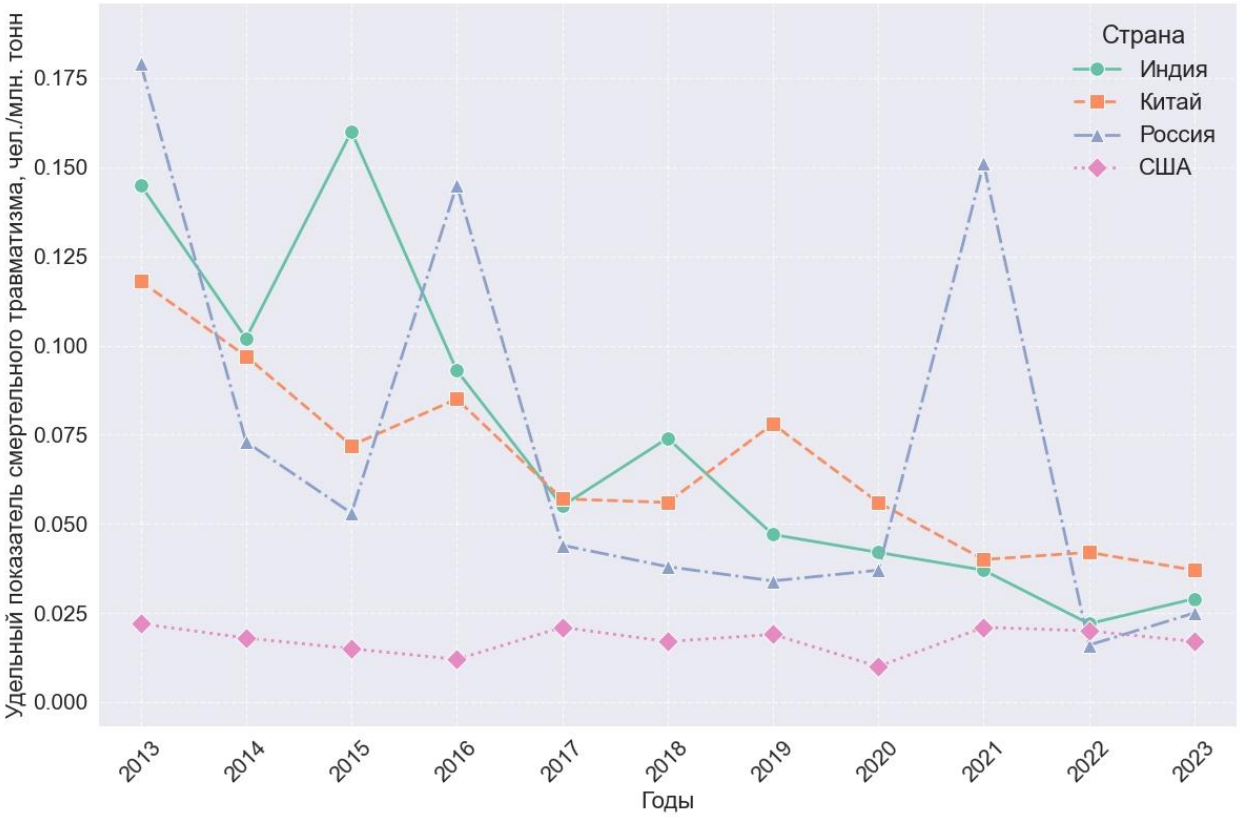

Рис. 1.4. – Динамика удельного показателя смертельного травматизма при добыче угля по странам в 2013-2023 гг.

Индия, имевшая высокие значения показателя в начале периода (0,145 чел./млн тонн в 2013 г.), достигла значительного прогресса, уменьшив удельный показатель смертельного травматизма до 0,029 в 2023 году (снижение на 80%). Однако в 2015 году наблюдался существенный всплеск до 0,16 чел./млн тонн.

Наблюдаемые значения удельного показателя смертельного травматизма в России характеризуются наиболее выраженной изменчивостью. Несмотря на общий тренд к снижению с 0,179 до 0,025 чел./млн тонн (снижение на 86% за рассматриваемый период), наблюдаются

резкие всплески в 2016 (0,145 чел./млн тонн) и 2021 (0,151 чел./млн тонн) годах, что в 4-5 раз превышает среднегодовые значения последних лет. Данные пики показателей травматизма связаны с катастрофическими авариями на шахтах «Северная» и «Листвяжная».

В Китае, несмотря на лидерство по абсолютному количеству смертельных случаев, наблюдается устойчивое снижение удельного показателя смертельного травматизма с 0,118 в 2013 году до 0,037 в 2023 году (на 68,6%) с менее выраженными колебаниями по сравнению с Россией и Индией. Это свидетельствует о том, что столь высокие абсолютные показатели травматизма в значительной степени обусловлены масштабами добычи. Однако, среднее значение удельного показателя смертельного травматизма за период с 2018 по 2023 год все равно остается более высоким по сравнению с другими странами (Китай – 0,051, Россия – 0,050, Индия – 0,043, США – 0,017).

Угледобыча в Китае существенно отличается от других стран тем, что из-за глубоко залегающих запасов угля 87% его добычи приходится на угольные шахты, а остальные 13% добываются открытым способом [1]. В других же странах, основная часть угля добывается в ходе открытых горных работ, например, в Индии 96.2% угля добывается открытым способом (без учета смешанной добычи), в Австралии – 76.7%, в России – 75.2%, а в США – 63.9%. Открытая добыча экономически более эффективна, так как позволяет извлекать большие объёмы угля при сравнительно низких затратах, такой метод добычи дает доступ к более крупным пластам угля, которые залегают близко к поверхности, что упрощает его извлечение и транспортировку.

Однако, не все залежи угля доступны для разработки открытым способом, что приводит к необходимости использования подземного способа добычи. Такой способ добычи является более дорогостоящим и связан с более высокими рисками для жизни и здоровья работников. Между долей добычи и долей травматизма при подземной угледобыче наблюдается

значительная диспропорция: в России при доле подземной добычи 24,8% на нее приходится 87,5% случаев смертельного травматизма. Похожая ситуация наблюдается и в США, где 65,4 % случаев смертельного травматизма происходит при проведении подземных горных работ по добыче угля, на которые приходится 35,7 % от общего объема его добычи. Даже в Индии, где в угольных шахтах добывается всего 1,8 % угля, на подземный способ приходится 40,6 % от общего числа смертельно травмированных.

Для более точной оценки распределения смертельного травматизма в зависимости от вида работ и проведения сравнительного анализа между странами были рассчитаны средние значения удельного показателя смертельного травматизма за период с 2013 по 2023 гг., а для оценки опасности подземных горных работ по сравнению с открытыми горными работами - введен коэффициент опасности подземных работ, определяемый как отношение удельного травматизма при подземных работах к удельному травматизму при открытых работах (табл. 1.2).

Таблица 1.2. – Сравнительные показатели травматизма при подземном и открытом способах добычи угля за 2013-2023 гг.

Показатель	**Россия**	**США**	**Индия**
Общее количество смертельно травмированных при подземных и открытых горных работах, чел.	305	127	505
Количество смертельно травмированных при подземных горных работах, чел.	267	83	205
Количество смертельно травмированных при открытых горных работах, чел.	38	44	300
Суммарная добыча за период, млн тонн	4493,1	7377,3	8004,8
Доля подземной добычи, %	24,8	35,7	1,8
Удельный смертельный травматизм (общее значение), чел./млн тонн	0,068	0,017	0,063
Удельный смертельный травматизм (подземные работы), чел./млн тонн	0,240	0,032	1,423
Удельный смертельный травматизм (открытые работы), чел./млн тонн	0,011	0,009	0,039
Коэффициент опасности подземных работ	21,82	3,56	36,49

Полученные значения показателей, представленные в табл. 2, говорят об огромных различиях в уровне производственного травматизма между подземным и открытым способах добычи угля. В Индии, несмотря на очень низкую долю подземной добычи угля в общем объеме (1,8%), фиксируется максимальный удельный показатель смертельного травматизма для подземных горных работ – 1,423 чел./млн тонн, что в 36,49 раз больше аналогичного показателя для открытых горных работ (0,039 чел./млн тонн).

Также большой разрыв между смертельным травматизмом при подземной и открытой добыче угля характерен для России, где наблюдается очень высокий коэффициент опасности подземных работ – 21,82, в шесть раз превышающий данный показатель для США (3,56).

Значения удельных показателей смертельного травматизма также показывают существенные различия между странами. При подземной добыче наименьший показатель наблюдается у США (0,032 чел./млн тонн), что в 7,5 раз ниже, чем в России (0,240 чел./млн тонн) и в 44,5 раз ниже, чем в Индии (1,423 чел./млн тонн).

При открытых горных работах наблюдается меньший разброс показателей между странами. США также демонстрирует наилучший результат (0,009 чел./млн тонн), однако разрыв с другими странами уже не так велик - показатель России (0,011 чел./млн тонн) превышает американский в 1,2 раза, что свидетельствует о сопоставимом уровне безопасности при открытой добыче, а индийский (0,039 чел./млн тонн) – в 4,3 раза.

Коэффициент опасности подземных работ может служить показателем, характеризующим относительную опасность подземной добычи по сравнению с открытой в конкретных горно-геологических и технологических условиях каждой страны. Существенные различия в значениях данного коэффициента указывают на возможный потенциал снижения травматизма при подземной добыче в России и Индии за счет внедрения новых подходов к предупреждению аварий на угольных шахтах и минимизации их последствий.

Угольная промышленность в разных странах сталкивается с различными проблемами безопасности, которые являются результатом сложного взаимодействия геологических, технологических и организационных факторов [3]. Это отражается в том числе и в отличающейся структуре причин травматизма и аварийности между странами, однако можно выделить и ряд общих проблем.

Анализ причин смертельного травматизма в Индии и США за период с 2013 по 2023 гг. показывает схожие тенденции в структуре причин смертельного травматизма, несмотря на существенные различия в динамике и технологических особенностях добычи угля.

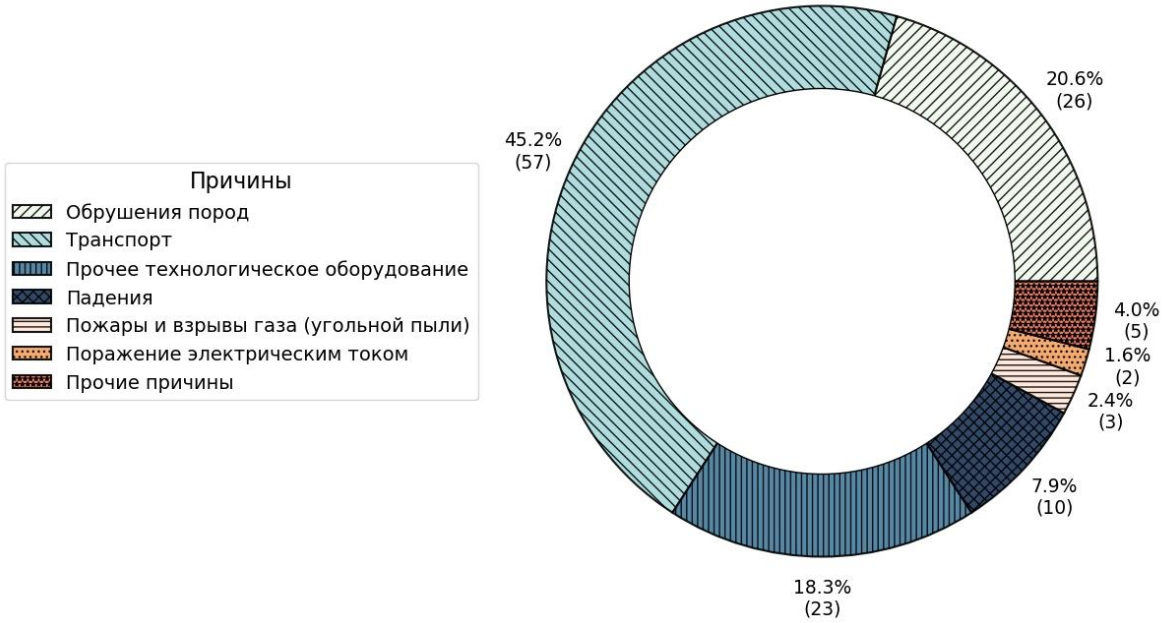

Рис. 1.5. – Причины смертельного травматизма при добыче угля в США в 2013-2023 гг.

В США основными причинами смертельного травматизма являются происшествия, связанные с транспортом (45,2%), обрушения пород (20,6%) и несчастные случаи при работе с технологическим оборудованием (18,3%) (рис. 1.5).

В Индии также преобладают транспортные происшествия (34,3% смертельно травмированных) и случаи, связанные с обрушением пород и оползнями при открытых горных работах, в результате которых гибнет почти

четверть работников. Существенную долю также составляют инциденты с технологическим оборудованием (15,6%) и падения (10,1%) (рис. 1.6).

Важно отметить, что доля пожаров и взрывов газа, угольной пыли в обеих странах относительно невелика и составляет 2,4% в США и 2,2% в Индии, что может быть обусловлено преобладанием открытого способа добычи – 96,2% в Индии и 63,9% в США, а также различиями в горно-геологических условиях по сравнению с Россией и Китаем.

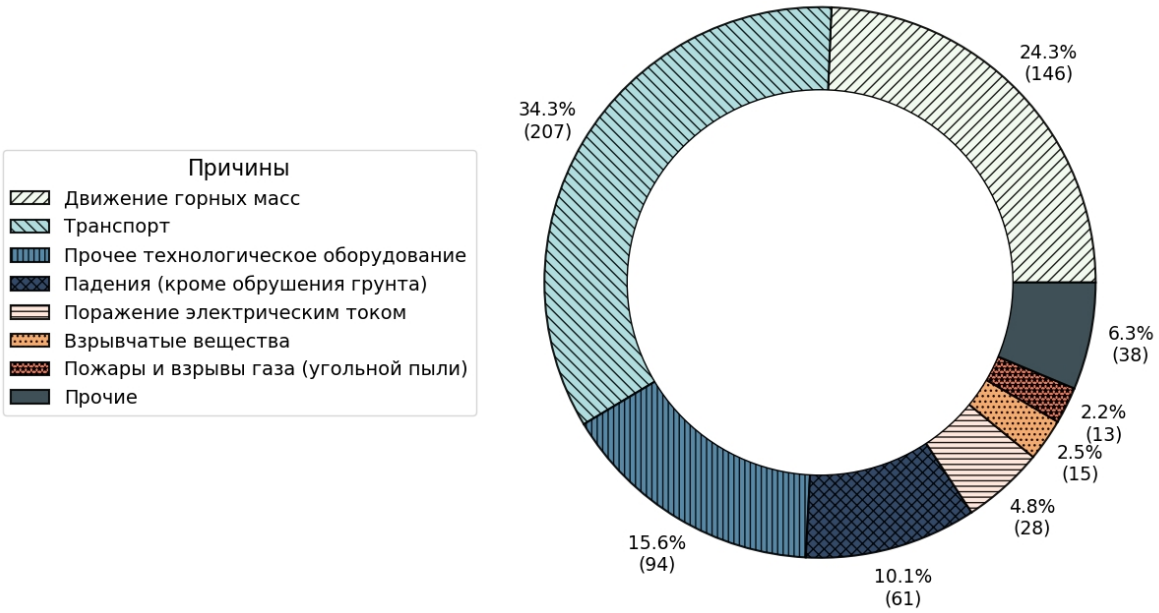

Рис. 1.6. – Причины смертельного травматизма при добыче угля в Индии в 2013-2023 гг.

Принципиально иная ситуация наблюдается в Китае, крупнейшем в мире производителе угля, где более 80% его добычи осуществляется подземным способом. В Китае наибольшую опасность представляют взрывы газа, на которые приходится 35,7% всего смертельного травматизма. Второе место занимают обрушения пород (17,7%), далее следуют затопления (11,6%) и пожары (7,3%). При этом анализ аварийности за тот же период показывает несколько иное распределение: обрушения пород составляют 24,3% от общего числа аварий, взрывы газа – 17,2%, а транспортные происшествия и затопления 14% и 8,6% соответственно (рис. 1.7).

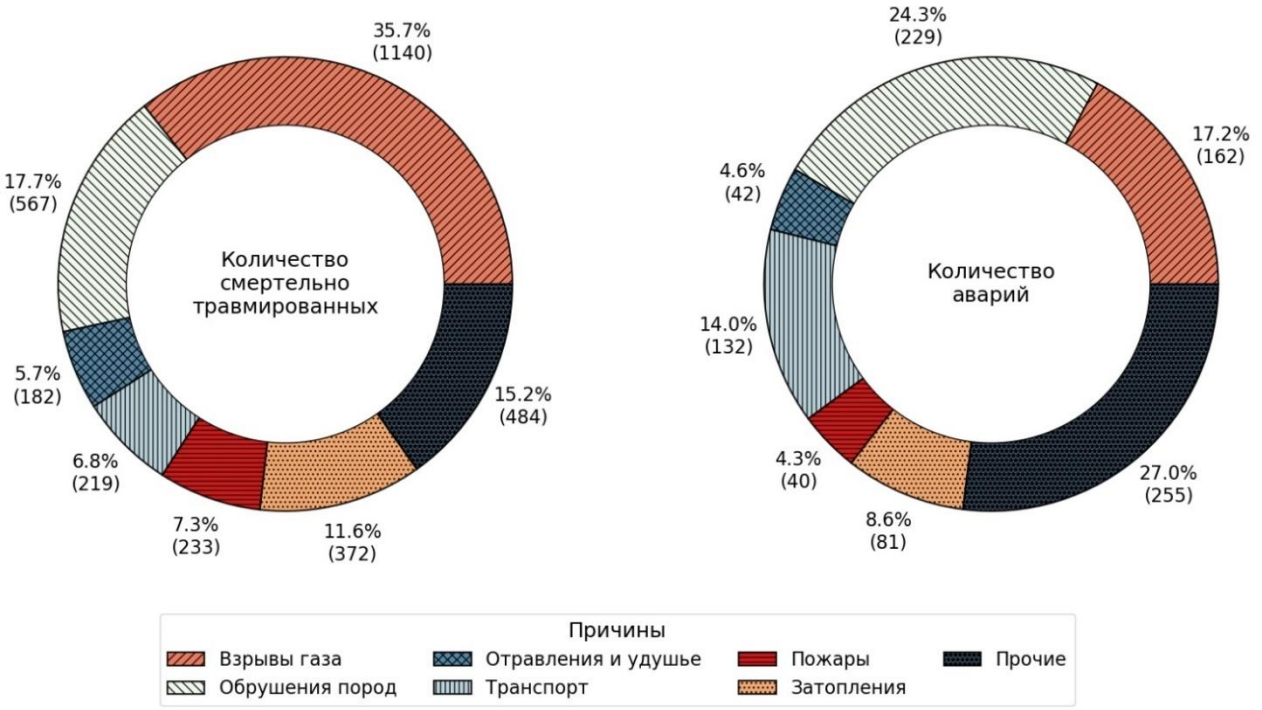

Рис. 1.7. – Структура смертельного травматизма и аварийности при добыче угля в Китае в 2012-2023 гг.

Взрывы газа являются наиболее тяжелым видом аварий при добыче угля в Китае – среднее количество смертельно травмированных на один взрыв составляет 7 человек. Также, несмотря на сравнительно небольшую долю пожаров в структуре аварийности, они являются вторым по тяжести видом аварий, со средним числом смертельно травмированных 5,8 чел./случай, что говорит о необходимости приоритетного внимания к предотвращению взрывов газа и пожаров.

В России, как и в Китае, обрушение пород является самым распространенным видом аварий, составляя 33,8% от общего их числа. Несмотря на меньшую долю подземной добычи (24,8% от всего добываемого угля), в России наблюдается самая высокая концентрация происшествий, связанных с взрывами газа, угольной пыли и пожарами – на пожары приходятся 27,9% всех аварий за рассматриваемый период, а на взрывы (горение, вспышки) газа и угольной пыли 23,5%. Далее следуют внезапные выбросы угля, породы и газа и горные удары, которые происходят значительно реже, составляя 7,4% от всех аварий, а также затопления с долей

5,9 % (рис. 1.8).

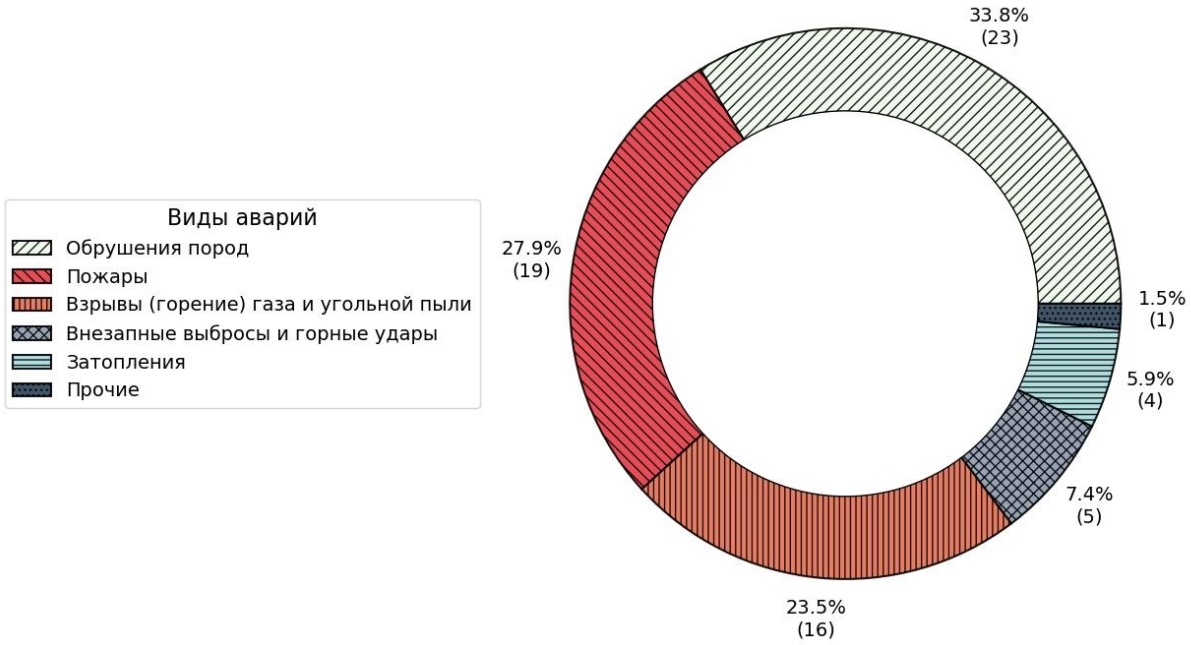

Рис. 1.8. – Виды аварий, произошедших при добыче угля в России в 2013-2023 гг.

При сходной структуре основных видов аварий в России и Китае, относительная доля взрывов газа, угольной пыли и пожаров в России существенно выше (51,4% против 21,5% в Китае).

Возможно выделить две группы стран с принципиально различными моделями распределения рисков. В первой группе (США и Индия) преобладают травмы, связанные с механизацией работ и человеческим фактором – транспортные происшествия, падения и аварии, связанные с эксплуатацией технологического оборудования. Во второй группе (Россия и Китай) ключевую роль играют взрывы газа и угольной пыли, пожары и основные риски связаны в большей степени с природными факторами.

Такое различие может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, способом добычи полезных ископаемых – в США и особенно в Индии значительная часть добычи ведется открытым способом, что существенно снижает риски, связанные с взрывами газа и пожарами. Во-вторых, горно-геологическими условиями – месторождения в России и Китае характеризуются большей глубиной залегания, более высокой газоносностью

пластов и склонностью углей к самовозгоранию [4, 5]. Обрушение пород является единственным видом аварий, сохраняющим значительную долю в структуре травматизма и аварийности вне зависимости от страны, в России и Китае обрушение пород является самым распространенным видом аварий, что также может быть обусловлено необходимостью ведения работ на больших глубинах при повышенных нагрузках на крепь и в сложных горно-геологических условиях [6].

В России пожары, взрывы газа и угольной пыли составляют более половины всех аварий на угледобывающих предприятиях, что указывает на необходимость внедрения дополнительных мер безопасности, направленных на предупреждение данных аварий и минимизацию их последствий. При этом эндогенные пожары в России преобладают над экзогенными: за период с 2013 по 2023 гг. доля эндогенных пожаров составила 63,2 %, а экзогенных – 36,8 %. Это объясняется тем, что более 60% разрабатываемых в России шахтопластов являются склонными к самовозгоранию [7, 8].

Согласно данным Ростехнадзора, к основным причинам пожаров за рассматриваемый период относятся [9]:

– отсутствие надлежащего контроля за составом атмосферы в горных выработках;

– недостаточность работ по локации очагов самонагревания в целиках угля и выработанном пространстве;

– отсутствие надлежащего контроля за состоянием вентиляционных сооружений;

– внесение необоснованных изменений в схему проветривания шахты, приведших к повышению аэродинамического давления в выработанном пространстве лавы;

– отсутствие расчетного расхода воздуха в лаве;

– фрикционное искрение в результате фрикционного трения струга об породы кровли при отсутствии взрывозащитного орошения по лаве;

– недостаточный уровень организации и осуществления производственного контроля;

– отсутствие контроля за состоянием взрывозащитного орошения в лаве;

– неэффективные способы предотвращения утечек воздуха в выработанное пространство.

Подземные пожары представляет большую опасность для жизни и здоровья горнорабочих из-за выделения больших количеств токсичных газов, распространяющихся по вентиляционному контуру и способных поражать большие участки вентиляционной сети [10-12].

В дополнение к этому, пожары могут спровоцировать взрывы выделяющихся из угольных пластов горючих газов. Особого внимания также заслуживает наличие взаимосвязи между пожарами и взрывами в подземных выработках и значительная вероятность перехода одного вида аварии в другой. Например, пожар может стать источником воспламенения метановоздушной смеси и привести к взрыву газа. Взрыв газа, в свою очередь, часто инициирует взрыв угольной пыли, поскольку ударная волна поднимает осевшую пыль, создавая взрывоопасную концентрацию в воздухе. Эта цепочка событий приводит к значительному увеличению масштабов аварии и особенно характерна для России и Китая [13, 14].

Стоит отметить, что в системе профилактических мероприятий по снижению взрывопожароопасности угольных пластов основной акцент сделан на метан, однако наряду с метаном в состав газов угленосных отложений входят также тяжелые углеводороды, включающие как предельные (гомологи метана), так и непредельные углеводороды [4, 15]. Эти газы представляют повышенную опасность, поскольку имеют более низкую температуру воспламенения и меньшие значения нижнего концентрационного предела взрываемости по сравнению с метаном в сочетании с более высокой теплотворной способностью [13, 16]. Таким образом, воспламенение тяжелых углеводородов, выделяющихся в процессе

механического разрушения газоносного угольного пласта, может дать тепловой импульс для взрыва метана, поднимающего в воздух и нагревающего угольную пыль, вследствие чего происходит выделение из неё тяжелых углеводородов и последующее их воспламенение, что еще больше увеличивает суммарную энергию взрыва [17].

1.2. Современные подходы к обеспечению пожарной безопасности шахт

Проблема борьбы с подземными пожарами продолжает оставаться одним из наиболее значимых направлений исследований в области пожарной и промышленной безопасности горных предприятий. Это обусловлено не только высокой потенциальной тяжестью последствий таких аварий, но и спецификой их развития в условиях подземных горных выработок: ограниченного объема, принудительного проветривания, значительной протяженности вентиляционной сети, а также невозможности визуального контроля большей части аварийной зоны [18, 19, 20].

Подземный пожар практически сразу становится элементом аэрогазодинамической системы шахты, поскольку продукты горения вовлекаются в вентиляционный поток и распространяются по выработкам, формируя зоны теплового и токсического воздействия не только вблизи очага, но и на значительном удалении от него [12, 21]. В связи с этим развитие пожара в значительно степени определяет условия эвакуации людей, возможность ведения горноспасательных работ и необходимость выбора аварийного вентиляционного режима с учетом фактического распространения дыма, температуры и токсичных газов [22, 23].

В отечественной научной школе вопросы предупреждения, обнаружения, локализации и ликвидации подземных пожаров традиционно рассматривались в тесной связи с задачами рудничной аэрологии, горноспасательного дела, пожарной профилактики и управления аварийными вентиляционными режимами. Вопросам, связанным с данной тематикой

посвящены работы А.А. Скочинского, А.М. Терпигорева, В.М. Огиевского, К.З. Ушакова, Л.Н. Быкова, В.М. Жадана, Б.И. Медведева, А.Е. Умнова, В.Г. Игишева, Л.П. Белавенцева, Г.И. Коршунова, В.В. Соболева, С.Б. Романченко, Ю.Ф. Булгакова, В.Н. Костеренко, Б.П. Казакова, Л.Ю. Левина, А.В. Зайцева, М.А. Семина, С.С. Кобылкина, А.В. Вяльцева, А.В. Лобазнова, М.Д. Попова, а также H. Ingason, A. Lönnermark, R. Hansen, C.C. Hwang, L. Yuan, J.H. Rowland, W.K. Chow и других исследователей. В современных исследованиях указанное направление развивается в сторону совершенствованию методов раннего обнаружения пожаров и автоматизированного контроля параметров рудничной атмосферы, расчетного анализа аварийных вентиляционных режимов и оценки устойчивости воздушных потоков.

Одним из направлений исследований является оценка пожарной опасности технологических объектов шахты. Для угольных шахт значительную опасность представляет ленточный конвейерный транспорт, поскольку конвейерные выработки имеют значительную протяженность, содержат горючую нагрузку в виде конвейерной ленты и часто являются частью основных транспортных и вентиляционных путей. В работе А.В. Вяльцева показано, что пожары на конвейерных линиях остаются одним из наиболее распространенных и опасных видов экзогенных подземных пожаров, а процесс их возникновения во многом связан с аварийными режимами работы приводных узлов, пробуксовкой ленты и тепловым трением [24]. В указанной работе предложена математическая модель возникновения пожара при пробуксовке приводного барабана ленточного конвейера, в которой существенным параметром является время от начала пробуксовки до достижения температурного диапазона возгорания смеси угольной пыли, продуктов износа ленты и футеровки барабана [24].

Значительное место в исследованиях занимают вопросы раннего обнаружения подземных пожаров. В работе А.В. Лобазнова отмечено, что системы аэрогазового контроля на шахтах и рудниках первоначально

создавались главным образом для контроля аэрогазовой безопасности, тогда как функция надежного обнаружения начальной стадии пожара в них в явном виде не была реализована [18]. Вследствие этого задача распознавания пожароопасной ситуации длительное время фактически оставалась за горным диспетчером, который должен был анализировать большой объем разнородной информации при ограниченном времени принятия решения.

Существенным результатом работы [18] является переход от простого порогового контроля отдельных параметров к использованию динамических признаков пожара. В качестве дополнительных информационных параметров было предложено учитывать скорости нарастания концентрации оксида углерода и температуры воздушного потока, а подземный пожар считать обнаруженным при превышении этих скоростей соответствующих предельных значений, определяемых с учетом текущих параметров шахтной атмосферы и характеристик участка. Такой подход имеет принципиальное значение, поскольку начальная стадия пожара может проявляться не столько абсолютным превышением концентрации CO или температуры, сколько характерным изменением этих величин во времени, а задача обнаружения пожара связывается уже не только с наличием соответствующих датчиков, но и с алгоритмической обработкой временных рядов измерений.

В ряде зарубежных экспериментальных исследований показано, что выбор типа датчиков и их размещение также существенно влияют на время обнаружения пожара. В работах [25-27] изучались характеристики отклика газовых, дымовых и пламенных датчиков при горении типичных шахтных горючих материалов, включая древесину, уголь, полимерные материалы, конвейерные ленты и дизельное топливо. В ходе исследований установлено, что использование только одного контролируемого признака, например, только концентрации оксида углерода или только оптической плотности дыма, не обеспечивает одинаковой надежности раннего обнаружения для различных сценариев подземного пожара. Кроме того, было показано, что время отклика датчиков зависит от типа сенсора, положения очага, скорости

вентиляционного потока и расположения датчика относительно потока продуктов горения.

Еще одно важное направление исследований связано с расчетом аварийных вентиляционных режимов и влияния тепловой депрессии пожара на устойчивость воздушных потоков. В диссертационной работе М.Д. Попова подчеркивается, что пожар способен изменять скорость и направление движения воздуха в выработках, нарушить устойчивость проветривания, а также приводить к перераспределению продуктов горения по вентиляционной сети [19]. Для учета этих эффектов предложено использовать аппроксимирующие зависимости, полученные на основе экспериментальных исследований и многопараметрического трехмерного моделирования, в составе одномерного сетевого алгоритма расчета воздухораспределения [19].

Некоторые вопросы, касающиеся этого направления отражены и в отечественных исследованиях, посвященных расчету устойчивости проветривания по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» [28, 29]. В данных работах рассматривается возможность определения критической тепловой мощности источника тепловыделения и условий опрокидывания воздушного потока в наклонных выработках, а также применение алгоритмов для больших вентиляционных сетей. Эти исследования имеют большое практическое значение для подготовки аварийных вентиляционных режимов и оценки устойчивости проветривания. Однако для их применения необходимо задать исходные характеристики пожара, включающие место возникновения и мощность источника тепловыделения. В реальной аварийной ситуации эти параметры чаще всего неизвестны и должны быть определены по косвенным данным.

Анализ вышеперечисленных исследований показывает, что существующие подходы решают преимущественно смежные задачи. Методы оценки риска характеризуют вероятность возникновения пожара или опасность конкретного технологического узла. Методы раннего обнаружения

позволяют сократить время распознавания начальной стадии пожара, но в основном фиксируют факт возникновения аварийной ситуации. Газоаналитические и физические методы локации эндогенных очагов важны для предупреждения самовозгорания, но не всегда применимы к быстро развивающимся экзогенным пожарам в действующих выработках. Сетевые модели вентиляции позволяют рассчитывать аварийные вентиляционные режимы и распространение продуктов горения, однако требуют задания исходных параметров пожара, включая его местоположение и тепловую мощность.

Таким образом, в существующей научно-практической базе сформирован значительный задел в области предупреждения, раннего обнаружения и расчетного сопровождения подземных пожаров. Вместе с тем рассмотренные подходы в основном ориентированы либо на выявление факта возникновения пожара, либо на расчет последствий аварии при заданных параметрах очага. В условиях реальной аварии такие параметры, как местоположение очага, его интенсивность и дальнейшая динамика распространения опасных факторов, как правило, заранее неизвестны. Поэтому для повышения обоснованности противоаварийных решений требуется переход от регистрации отдельных признаков пожара к оперативной количественной оценке его текущего состояния и прогнозированию развития аварийной обстановки.

1.3. Шахтные пожары как объект оперативной оценки и прогнозирования

В отличие от наземных пожаров, шахтный пожар развивается в ограниченном объеме, в условиях принудительной вентиляции и при высокой протяженности путей эвакуации. При начальной стадии таких пожаров особо важное значение имеет время, в течение которого решения принимаются при неполной информации. Поэтому в начальной и развивающейся фазе аварии принципиально важно располагать не только

сведениями о факте возникновения пожара, но и количественной информацией о текущем состоянии очага. Наиболее содержательной характеристикой такого рода является мощность тепловыделения пожара (в зарубежной литературе - heat release rate, HRR) [21, 30, 31].

Мощность тепловыделения пожара $\dot{Q}$ в общем виде определяется как производная выделившегося количества тепла по времени:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \tag{1.1}$$

а при описании пожара через характеристики выгорания топлива может быть записана в виде:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \, \Delta h_{\text{эф}} \tag{1.2}$$

где $\dot{m}_f$ – массовая скорость выгорания горючего вещества, кг/с, $\Delta h_{\text{эф}}$ – эффективная теплота сгорания, Дж/кг.

В работе [30] показано, что именно мощность тепловыделения пожара является наиболее важной переменной при оценке пожарной опасности, так как она лучше, чем отдельные частные показатели, отражает развитие опасной обстановки во времени.

Особую значимость мощность тепловыделения приобретает в задачах шахтной вентиляции. Рост температуры в зоне пожара уменьшает плотность воздуха, вследствие чего в наклонных и вертикальных выработках возникает тепловая депрессия, способная вызывать изменение расхода воздуха, формирование неустойчивых режимов течения и даже опрокидывание вентиляционной струи. Таким образом, мощность тепловыделения пожара важна не только как характеристика интенсивности пожара, но и как параметр, определяющий способность очага нарушить режим проветривания [32, 33].

Помимо сведений о текущей интенсивности пожара также очень полезно знать и то, как распространяются опасные факторы пожара по

выработке. Для шахтных условий это прежде всего температура и концентрация оксида углерода, поскольку тепловое и токсическое воздействие распространяется по ходу движения воздуха и его степень в значительной степени определяет пригодность выработок для пребывания людей, эвакуации и ведения аварийно-спасательных работ [34].

В работах [12, 35] показано, что для обеспечения безопасного выхода людей необходимо уметь прогнозировать распространение CO по выработкам при пожаре, так как отравление оксидом углерода является одной из основных причин гибели людей при пожарах в шахтах. В более поздних исследованиях и обзорах по подземным пожарам дополнительно показано, что распределения температуры, токсичных газов и дыма во времени и пространстве зависят от вентиляции, тепловой мощности очага и геометрии выработки, а значит, должны рассматриваться как взаимосвязанные нестационарные поля тепломассопереноса, подлежащие расчету и прогнозированию, а не как набор пороговых сигналов отдельных датчиков [36-38].

Таким образом, следующий необходимый уровень информационного обеспечения должен включать не только данные об интенсивности пожара, но и прогнозные значения параметров опасных факторов пожара, прежде всего концентрации CO и температуры, на следующий момент времени. Такой подход будет способствовать повышению обоснованности и оперативности принятия решений при выборе аварийного режима проветривания горных выработок, уточнении безопасных маршрутов эвакуации и определении тактики локализации и ликвидации пожара, что особенно важно для работы шахтных и аварийно-спасательных служб в условиях ограниченного времени и неполноты информации.

1.4. Анализ способов и методов тушения подземных пожаров

От применяемых для локализации и ликвидации подземных пожаров методов и способов зависят характер дальнейшего развития пожаров и их

последствия. В зависимости от ситуации, наиболее эффективными могут оказаться разные методы и этот факт также стоит учитывать при прогнозировании пожаров, принимая во внимание возникающие сложности при тушении пожаров на угольных шахтах и необходимость оперативно реагировать на изменение обстановки в зоне аварии [39].

Из-за специфических условий в подземных горных выработках, таких как ограниченное пространство, наличие горючих материалов и взрывоопасной угольной пыли и газов, а также ограниченного доступа к месту пожара, тушение таких возгораний требует применения специальных методов и подходов, активная разработка которых продолжается сегодня как отечественными, так и зарубежными исследователями.

Применяемые способы тушения подземных пожаров подразделяются на 3 группы [40]:

1. Пассивный способ – прекращение доступа воздуха, прежде всего кислорода, к очагу горения путем возведения изоляционных перемычек, тампонирования трещин, затопления или закладки пожарного участка.
2. Активный способ предполагает подачу огнетушащих веществ к очагу, а также извлечение и охлаждение горящих масс при необходимости.
3. Комбинированный способ – сочетание изоляции очага с активным воздействием на него, включая переход от изоляции к непосредственному тушению после ослабления пожара.

К комбинированным способам также относят случаи, когда изолированный перемычками пожарный участок дополнительно затапливают инертными газами, заиливают или подвергают иному воздействию, направленному на ускорение подавления горения. Активное тушение является основным способом ликвидации экзогенных пожаров, однако при недоступности очага или угрозе жизни персонала переходят к изоляции либо комбинированному тушению.

Ликвидацию подземного пожара начинают с его локализации, целью которой является ограничение интенсивности горения и зон распространения опасных факторов пожара. Для этого регулируют подачу воздуха, устанавливают водяные завесы и временные ограждения, удаляют горючие материалы [41].

Большинство экзогенных пожаров тушат активным способом. Изоляцию при таких пожарах применяют, если прямое воздействие на очаг невозможно [41]. Эндогенные пожары, особенно расположенные в выработанном пространстве или других труднодоступных зонах, чаще ликвидируют пассивным или комбинированным способом. При комбинированном тушении изолированный объем можно последовательно уменьшать, возводя новые перемычки и ликвидируя отдельные очаги по мере ослабления горения [40].

Важную роль при локализации и тушении подземных пожаров играет управление вентиляцией. При пожаре вентиляционный режим выбирают с учетом возможности изменить направление распространения продуктов горения, снизить поступление кислорода к очагу и охлаждать смежные выработки [42]. Маневрирование вентиляционными струями применяют преимущественно при активном и комбинированном тушении, однако его использование требует учета газовой обстановки, устойчивости проветривания и возможного перераспределения опасных факторов пожара по сети выработок.

При активном способе тушения используют огнетушители, воду, пену и другие огнетушащие вещества. На угледобывающих предприятиях при тушении пожаров зачастую используется вода, подаваемая из шахтного противопожарного трубопровода. Подача воды компактной струей позволяет воздействовать на выбранную часть очага и оперативно изменять направление подачи [41].

Для профилактической обработки угольной массы и снижения ее склонности к воспламенению могут применяться растворы антипирогенов, в

том числе хлористый кальций [43].

В условиях труднодоступности очага, высокой температуры, а также опасности накопления и взрыва метана изоляция пожарных участков становится одним из наиболее надежных способов локализации и подавления пожара.

Изоляция может быть обеспечена перемычками в выработках, соединяющих пожарный участок с остальной шахтой. При этом, перемычки должны обладать высокой воздухонепроницаемостью, полностью перекрывать сечение выработки и возводиться в устойчивых боковых породах без трещиноватости. Для предотвращения подсоса воздуха предусматривают достаточную глубину вруба и уплотнение сопряжений с породным массивом. Возведение перемычек выполняют одновременно, что снижает опасность взрыва метана и повышает эффективность изоляции [44].

В шахтах, опасных по газу и пыли, изоляция требует учета риска взрыва и возведения защитных взрывоустойчивых перемычек. Такие перемычки возводятся на расстоянии 15-20 м от изолирующих в направлении очага пожара [39].

Эффективным дополнением к изоляции является инертизация пожарного участка. Она может осуществляться подачей азота, углекислого газа, парогазовых смесей или продуктов работы специальных генераторов. Инертные газы позволяют снизить содержание кислорода или горючих газов до уровней, при которых исключаются горение и взрывоопасные концентрации. Предпочтение часто отдается азоту, поскольку его плотность близка к плотности воздуха, он слабее сорбируется горными породами и малорастворим в воде, что уменьшает потери при заполнении выработок [45].

Подачу инертных газов при изоляции начинают до окончательного закрытия проемов в перемычках и продолжают до тех пор, пока анализ проб воздуха из изолированного участка не подтвердит снижение содержания кислорода до безопасных значений [41].

Выводы, цель и задачи исследований

Пожары являются одним из самых распространенных видов аварий в российских угольных шахтах и представляют большую опасность для жизни и здоровья горнорабочих, а также приводят к значительным экономическим потерям и экологическому ущербу. Кроме того, пожары в угольных шахтах могут приводить к разрушительным взрывам газа и угольной пыли с катастрофическими последствиями.

Для принятия обоснованных решений во время аварии важно располагать не только сведениями о факте возникновения пожара, но и оперативными данными о месте расположения очага и текущем состоянии пожара. Одной из наиболее содержательных количественных характеристик пожара является мощность тепловыделения. Данный параметр характеризует интенсивность выделения тепловой энергии при горении и является одним из ключевых показателей, определяющих развитие опасной обстановки во времени. Наряду с оценкой местоположения очага и текущей мощности тепловыделения важное значение имеет также прогнозирование опасных факторов пожара в горной выработке, прежде всего температуры и концентрации оксида углерода, так как они являются одними из основных показателей теплового и токсического воздействия пожара.

Анализ рассмотренных подходов к обеспечению пожарной безопасности шахт показал, что существующие методы в основном ориентированы либо на выявление факта возникновения пожара, либо на расчёт последствий аварии при заранее заданных параметрах очага, которые в условиях реального пожара, как правило, неизвестны. При этом упрощённые расчётные зависимости дают приближённую и неполную картину пожарной обстановки, а детальное численное моделирование требует значительных временных и вычислительных затрат, а также предварительного задания исходных данных, которые в момент аварии отсутствуют либо характеризуются высокой степенью неопределённости.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка метода

оперативного оценивания параметров и прогнозирования опасных факторов пожара в протяженных горных выработках.

Для достижения поставленной цели решался ряд задач, основные из которых:

- Провести анализ статистических данных по авариям на угольных шахтах, а также обзор современных подходов к моделированию пожаров в угольных шахтах;
- Разработать расчетную постановку и параметризовать трехмерную численную модель пожара в наклонной горной выработке, провести верификацию полученной модели;
- Исследовать факторы, влияющие на распространение опасных факторов пожара в горных выработках;
- Разработать метод оперативной оценки местоположения очага пожара, текущей мощности тепловыделения и прогнозирования опасных факторов пожара по данным ограниченной измерительной конфигурации;
- Исследовать влияние конфигурации точек и каналов измерения на точность решения задач оперативной оценки и прогноза и обосновать рационально достаточную схему наблюдения.

2. ФОРМИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

2.1. Обзор современных способов моделирования пожаров в шахтах

Наиболее широко используемыми на сегодняшний день методами моделирования пожаров являются методы, основанные на численном решении уравнений гидрогазодинамики или CFD-методы (computational fluid dynamics).

Принципы вычислительной динамики жидкости и газа широко применяются в рудничной вентиляции при исследовании таких процессов, как движение воздушных потоков, пыли, горючих и ядовитых газов, развитие пожаров, а также при расчетах эффективности и устойчивости вентиляции. CFD-методы необходимы, когда всесторонний анализ с использованием физических экспериментов затруднен, поскольку требует наличия специализированных подземных полигонов или экспериментальных шахт, дорогостоящего оборудования и обеспечения безопасности персонала.

В CFD используются численные методы и алгоритмы, предназначенные для расчета и анализа течений жидкостей и газов, процессов тепломассопереноса, многофазных сред, химических реакций и связанных с ними физических явлений. Применение CFD-моделирования позволяет оценивать развитие воздушных и газовых потоков при заданных начальных и граничных условиях, геометрии расчетной области, а также физических свойствах среды [46, 47].

Движение воздушных и газовых потоков в горных выработках, как правило, имеет сложный характер и в большинстве случаев протекает в режиме развитой турбулентности. При этом поля скорости, давления, температуры и концентраций характеризуются выраженной пространственно-временной неоднородностью и наличием вихревых структур различного масштаба.

Классификация существующих подходов к численному моделированию турбулентных течений основана на степени детальности

разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. С учетом этого признака можно выделить четыре основных подхода: прямое численное моделирование (direct numerical simulation, или DNS), метод крупных вихрей (large eddy simulation, или LES), метод отсоединенных вихрей (detached eddy simulation, или DES) и метод, основанный на осреднении по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier-Stokes, или RANS) [48].

Прямое численное моделирование (DNS) предполагает решение уравнений Навье-Стокса без каких-либо моделей турбулентности. Этот метод разрешает все пространственные и временные масштабы турбулентного течения, включая самые мелкие вихри.

Преимущества DNS включают точное воспроизведение всех характеристик турбулентного течения. Однако данный метод требует огромных вычислительных ресурсов, что делает его применимым только для течений с относительно низким числом Рейнольдса.

Метод крупных вихрей (LES) в свою очередь крупных вихрей турбулентного течения, разрешая их напрямую, тогда как мелкие вихри моделируются с использованием подрешеточных моделей (subgrid-scale models). Крупные вихри ответственны за основные динамические процессы в турбулентном потоке и могут быть разрешены численно, тогда как мелкие вихри считаются изотропными и их влияние моделируется [49].

Метод отсоединенных вихрей (DES) представляет собой гибридный подход, сочетающий элементы RANS и LES. В областях течения, где сетка достаточно мелкая, используется LES, а в областях с крупной сеткой применяется RANS [50].

RANS основан на осреднении уравнений Навье-Стокса по времени или ансамблю, что позволяет выделить среднее течение и учитывать влияние турбулентных пульсаций через дополнительные модельные уравнения.

Уравнения RANS получают путем осреднения уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости [48, 49]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.1)$$

Осреднение этих уравнений по времени приводит к:

$$\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial t} + \overline{u_\jmath} \frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_\iota}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

где $\overline{u_\iota}$ - осредненные компоненты скорости, $\bar{p}$ - осредненное давление, и $\overline{u_i' u_j'}$ - тензор Рейнольдсовых напряжений, который моделирует влияние турбулентных пульсаций на среднее течение. Этот тензор добавляется к уравнениям как дополнительный источник напряжений и требует моделирования.

Для решения задач вычислительной гидродинамики применяются программные пакеты общего назначения, такие как ANSYS и FlowVision, а также специального, например, Fire Dynamics Simulator (FDS) [51, 52].

CFD-моделирование часто применяется для исследования пожаров и связанных с ними аварийных процессов в шахтах. Например, в работе [53] разработана CFD-модель выработанного пространства реальной лавы с использованием данных шахтных измерений. Численная модель позволила рассчитать распределения скорости воздуха и концентрации кислорода определить границы зоны повышенного риска самовозгорания угля.

Пожары в угольных шахтах являются одной из причин взрывов, которые в свою очередь могут явиться причиной обрушения горных пород и экзогенных пожаров. В работе [54] CFD-моделирование было использовано для расчета распространения ударно-воздушных волн в горных выработках и выработанном пространстве. Расчеты позволили определить распределения избыточного давления с учетом отражения и интерференции волн в сопряжениях выработок. В этой же работе описан способ инженерных расчетов для выбора оптимальной тактики аварийно-спасательных работ в угольных шахтах и рудниках.

Однако стоит отметить, что применение CFD-методов при моделировании пожаров в масштабных вентиляционных сетях, состоящих из

сотен выработок может быть существенно затруднено по причине огромной вычислительной сложности таких задач. Сравнение результатов полномаштабных экспериментов в подземной горной выработке и результатов CFD-моделирования (с использованием FDS) показало, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными, при этом среднее значение максимальных отклонений на всех участках составило 24 %, а наименьшие отклонения, полученные вблизи очага пожара и в верхней части выработки, составляли около 10 % [37].

Для моделирования пожаров в шахтах также используются инструменты анализа вентиляционной сети шахты, такие как Ventsim и VnetPC [55]. Эти инструменты просты в использовании и не требуют больших вычислительных затрат, в отличие от CFD-моделей, что позволяет проводить расчеты для сложных вентиляционных сетей целиком. Они могут использоваться для определения оптимальных путей эвакуации в зависимости от места возможного пожара и времени, имеющегося у рабочих для безопасной эвакуации. Также данные модели используются при исследовании самовозгорания угля [55, 56]. Такое программное обеспечение позволяет моделировать сценарии пожара с учетом характеристик и режимов работы основных вентиляторов, а также характеристик вентиляционного контура, таких как форма, сечение, длина и глубина подземных полостей [57].

Таблица 2.1 – Сравнение программных средств, применяемых при моделировании пожаров в шахтах

№ п/п	Наименование программного комплекса, страна-разработчик	Основа модели	Достоинства	Ограничения
1	2	3	4	5
1.	ANSYS Fluent (США)	Полевое CFD-моделирование:	- Предоставление подробных данных о	- Большая продолжительност

2.	Fire Dynamics Simulator (США) - пользовательские интерфейсы: Fenix+ (Россия), PyroSim (США)	численное решение уравнений сохранения массы, импульса (уравнений движения Навье-Стокса) и энергии с возможностью учета тепломассопереноса, турбулентности и горения	газодинамических параметрах, концентрациях продуктов горения, тепловом потоке - Возможность учета сложной геометрии моделируемой области - Возможность учета физико-химических процессов	ь вычислений, возрастающая при расширении области моделирования и увеличении разрешения сетки
3.	FlowVision (Россия)			
4.	Ventsim (Австралия)	Сетевое моделирование: представление системы горных выработок в виде сети взаимосвязанных ветвей с решением уравнений баланса расходов и давлений	- Возможность моделирования протяженных и разветвленных вентиляционных сетей - Сравнительно низкие вычислительные затраты - Анализ воздухораспределения и изменения вентиляционного режима по всей сети, в том числе при аварийных ситуациях	- Параметры потока определяются преимущественно как усредненные по сечению выработки - Локальная трехмерная структура течения и пространственное распределение параметров в выработке непосредственно не разрешаются
5.	VnetPC (США)			
6.	«Вентиляция 2» (Россия)			
7.	«Аэросеть» (Россия)			

Таким образом, рассмотренные подходы к моделированию пожаров в угольных шахтах имеют различную область рационального применения. Сетевые модели вентиляции позволяют выполнять расчеты воздухораспределения в протяженных и разветвленных системах горных выработок при сравнительно низких вычислительных затратах, что делает их эффективными при анализе вентиляционного режима шахты в целом. Вместе с тем такие модели не обеспечивают необходимой детализации пространственно-временного распределения температуры, концентраций продуктов горения и локальных газодинамических параметров в зоне развития пожара.

Для решения задачи настоящего исследования требуется формирование обучающего набора данных, содержащего значения температуры и

концентрации оксида углерода в отдельных точках горной выработки при различных положениях очага, мощностях тепловыделения, скоростях вентиляционного потока уклонах и геометрических параметрах поперечного сечения выработки. Получение таких данных предполагает расчет не только параметров воздухораспределения в вентиляционной сети, но и локальной пространственно-временной динамики тепломассопереноса, включая распределение температуры и концентраций продуктов горения по всему объему рассматриваемого участка выработки. Поэтому для подготовки расчетных данных в работе целесообразно использовать полевые методы моделирования, основанные на численном решении уравнений гидрогазодинамики.

В качестве инструмента численного моделирования был выбран FDS, поскольку он специально предназначен для моделирования пожарообусловленных течений, расчёта переноса тепла и продуктов горения. Дополнительным основанием выбора FDS является использование в нём подхода крупных вихрей, при котором крупные энергонесущие вихревые структуры рассчитываются непосредственно, а влияние мелкомасштабной турбулентности учитывается подрешёточной моделью. В отличие от подходов, где влияние турбулентных пульсаций учитывается преимущественно через модельные замыкания для осреднённых уравнений, LES позволяет более детально описывать пространственно-временную структуру нестационарного течения.

2.2. Физико-математическая модель пожара в горной выработке

Моделирование динамики развития пожара в ограниченном пространстве горных выработок требует решения сложной системы нестационарных уравнений газовой динамики. Специфика объекта исследования отражается в наличии протяженных выработок, вынужденной вентиляции и сложного взаимодействия возникающих при пожаре сил плавучести с вентиляционным потоком, что обуславливает необходимость

применения полевых методов моделирования (CFD).

Используемая в настоящей работе физическая модель базируется на решении уравнений Навье-Стокса для низкоскоростных (дозвуковых) течений газа с акцентом на перенос дыма и тепла. Ключевой особенностью математической постановки задачи является использование приближения малых чисел Маха, что позволяет исключить влияние акустических волн и существенно повысить эффективность вычислений без потери точности при описании тепломассопереноса в низкоскоростных течениях [58, 59].

В основе математического моделирования лежит система уравнений, описывающих изменение во времени и пространстве основных параметров системы: плотности, температуры, концентраций компонентов газовой среды, а также скорости движения. Эта система включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнения переноса компонентов газовой смеси.

Уравнение неразрывности выражает закон сохранения массы газовой смеси и имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0 \qquad (2.3)$$

где ρ – плотность смеси, $\mathbf{u}$ – вектор скорости смеси, t – время, ∇ – оператор набла.

Уравнение движения (сохранения импульса) основано на втором законе Ньютона и описывает изменение импульса газовой смеси под действием сил давления, вязкости и внешних сил (например, силы тяжести). В общем виде оно записывается как:

$$\frac{\partial (\rho \mathrm{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{u} \otimes \mathrm{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \mathrm{g} \qquad (2.4)$$

где p – давление, τ – тензор вязких напряжений, g – вектор ускорения свободного падения, $\otimes$ – символ тензорного произведения.

Уравнение энергии описывает изменение теплового состояния газовой смеси за счет теплопереноса, работы сил давления, а также тепловыделения при химических реакциях. Для газовой смеси его можно записать в виде:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \boldsymbol{u}) = \frac{\partial p_0}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla p_0 - \nabla \cdot \boldsymbol{q} + Q_c \qquad (2.5)$$

где h – удельная энтальпия смеси без учёта энтальпий образования компонентов, p_0 – термодинамическое давление, $\boldsymbol{q}$ – суммарная плотность теплового потока, Q_c – объёмная мощность тепловыделения при химических реакциях.

Уравнение переноса концентрации i-го компонента описывает изменение концентрации этого компонента в результате конвекции, диффузии и химических реакций:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \boldsymbol{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + R_i \qquad (2.6)$$

где Y_i – массовая доля i-го компонента, D_i – коэффициент молекулярной диффузии i-го компонента в смеси, R_i – скорость образования или расходования i-го компонента в результате химических реакций.

Для замыкания системы уравнений необходимо ввести уравнение состояния, связывающие термодинамические параметры (давление, плотность, температуру), а также модели турбулентности, горения и теплообмена излучением.

В условиях турбулентного течения, характерного для пожаров в шахтах, мгновенные значения параметров испытывают хаотические пульсации. Для моделирования турбулентности в FDS применяется метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES), в котором моделируется только влияние мелкомасштабных вихрей, а движение крупных вихрей разрешается непосредственно [60, 61].

Принцип LES заключается в пространственной фильтрации мгновенных значений переменных, что позволяет разделить движение на крупномасштабную (разрешаемую) и мелкомасштабную (подсеточную) части. Фильтрованная переменная $\bar{\phi}$ определяется как:

$$\overline{\phi}(\boldsymbol{x}, t) = \int_V \phi\,(\boldsymbol{x}', t)\, G(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}', \Delta)\, \mathrm{d}V' \qquad (2.7)$$

где G – функция фильтра, Δ – ширина фильтра, $\boldsymbol{x}$ – радиус-вектор.

Для переменных, переносимых потоком в условиях переменной плотности, используется фильтрация Фавра:

$$\tilde{\phi} = \frac{\overline{\rho\phi}}{\overline{\rho}} \tag{2.8}$$

Применение фильтрации к уравнениям сохранения приводит к появлению дополнительных членов, называемых подсеточными (Subgrid-Scale, SGS) напряжениями и потоками [62, 63].

Для замыкания подсеточных членов используется концепция турбулентной вязкости. В объеме потока используется модифицировання модель Дирдорфа [64]. Градиентные замыкания подсеточных напряжений, теплового потока и потока компонента записываются как:

$$\boldsymbol{T}_{sgs} \approx -2\mu_{sgs}[\boldsymbol{S} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \boldsymbol{u})\boldsymbol{I}] + \frac{2}{3}\rho k_{sgs}\boldsymbol{I} \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{q}_{h,sgs} \approx -\frac{\mu_{sgs}c_p}{Pr_t}\nabla T \tag{2.10}$$

$$\boldsymbol{q}_{Y_i,sgs} \approx -\frac{\mu_{sgs}}{Sc_t}\nabla Y_i \tag{2.11}$$

где μ_{sgs} – динамическая подсеточная вязкость, $\boldsymbol{S}$ – тензор скоростей деформации, $\boldsymbol{I}$ – единичный тензор, k_{sgs} – удельная подсеточная кинетическая энергия, c_p – удельная теплоёмкость смеси, Pr_t и Sc_t – турбулентные числа Прандтля и Шмидта соответственно.

Подсеточная вязкость и удельная подсеточная кинетическая энергия определяются как:

$$\mu_{sgs} = \rho C_\nu \Delta \sqrt{k_{sgs}} \tag{2.12}$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2}|\boldsymbol{u_c} - \hat{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{c}}|^2 \tag{2.13}$$

где C_ν - модельная константа, принимаемая равной 0,1; $\Delta -$ ширина фильтра, $\boldsymbol{u}_c$ – скорость в центре ячейки, $\hat{\boldsymbol{u}}_c$ – значение скорости после тестовой фильтрации с шириной 2Δ.

Модель химической кинетики описывает скорости образования и

расходования компонентов газовой смеси в процессе горения. Для упрощения расчетов часто используются одностадийные или многостадийные глобальные механизмы горения, учитывающие основные стадии и лимитирующие реакции. Терм R_i в уравнении переноса концентрации представляет собой чистую скорость образования или расходования i-го компонента в результате всех химических реакций. Для элементарной реакции $\nu_A A + \nu_B B \rightarrow \nu_C C + \nu_D D$ скорость реакции k_f часто описывается законом Аррениуса:

$$k_f = \mathrm{A} e^{-E_a/(RT)} \tag{2.14}$$

где A – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Скорость образования или расходования i-го компонента R_i для системы из N_r реакций может быть выражена как сумма скоростей по всем реакциям:

$$R_i = M_i \sum_{j=1}^{N_r} \left(\nu''_{ij} - \nu'_{ij}\right) k_j \prod_{k=1}^{N_s} [X_k]^{\nu'_{kj}} \tag{2.15}$$

где M_i – молярная масса i-го компонента, ν'_{ij} и ν''_{ij} – стехиометрические коэффициенты i-го компонента в j-й реакции в качестве реагента и продукта соответственно, k_j – константа скорости j-й реакции, $[X_k]$ – молярная концентрация k-го компонента, N_s – число компонентов.

В FDS для моделирования горения часто используются упрощенные модели, такие как модель фракции смеси (Mixture Fraction Combustion Model), которая предполагает мгновенное горение и равновесный состав продуктов, или модели с конечной скоростью реакции, основанные на концепции вихревой диссипации (Eddy Dissipation Model, EDM) или на упрощенных глобальных кинетических схемах.

Теплообмен излучением играет важную роль в распространении пожаров, особенно в условиях высоких температур и задымленности. В FDS для моделирования теплового излучения используется метод дискретных

ординат (Discrete Ordinates Method, DOM), в котором уравнение переноса излучения решается для конечного числа направлений в пространстве.

Уравнение переноса излучения (Radiative Transfer Equation, RTE) для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды имеет вид:

$$\frac{dI(x,s)}{ds} = \kappa_a I_b(x) - \kappa_a \mathrm{I}(x,s) - \kappa_s \mathrm{I}(x,s) + \frac{\kappa_s}{4\pi}\int_{4\pi} I(x,s')\Phi(s,s')d\Omega' \quad (2.16)$$

где $I(x,s)$ – спектральная интенсивность излучения в точке x в направлении s, s – расстояние вдоль направления s, κ_a – коэффициент поглощения, κ_s – коэффициент рассеяния, $I_b(x)$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела при температуре $T(x)$, $\Phi(s,s')$ – фазовая функция рассеяния, Ω' – телесный угол.

Метод дискретных ординат (DOM) аппроксимирует интеграл по телесному углу конечной суммой по выбранным дискретным направлениям. Это позволяет преобразовать интегральное уравнение в систему дифференциальных уравнений для каждого дискретного направления, которые затем решаются численно. Коэффициенты поглощения и рассеяния зависят от состава газовой смеси.

Представленные уравнения и модели составляют основу математического описания пожара. Для численного решения применяется метод конечных разностей на прямоугольной разнесенной сетке с использованием явной схемы интегрирования по времени второго порядка точности.

При формировании расчётной модели поверхности выработки задавались как слой горной породы с коэффициентом теплопроводности 1,8 Вт/(м·К), удельной теплоёмкостью 0,9 кДж/(кг·К) и плотностью 2400 кг/м³ [65, 66]. Теплообмен с породным массивом учитывался посредством решения одномерной задачи нестационарной теплопроводности в направлении, нормальном к поверхности выработки. Толщина расчётного слоя породы принималась равной 0,4 м, что существенно превышает характерную глубину распространения температурного возмущения в породном массиве за

рассматриваемый интервал моделирования, на внешней границе слоя задавалось адиабатическое условие.

На входном сечении выработки задавался продольный вентиляционный поток, а на выходном устанавливалось условие свободного выхода («OPEN»), минимизирующее влияние выходного сечения на структуру течения внутри рассматриваемого участка. Источник пожара задавался как площадной очаг размером 2,4×2,4 м. Выбор такой постановки не привязан к конкретному виду пожарной нагрузки (конвейерная лента, кабельная продукция, электрооборудование, горючие материалы и др.), а представляет собой обобщённую модель экзогенного пожара в горной выработке. Газофазное горение описывалось с использованием характеристик модельного углеводородного топлива.

Рассматриваемая модель пожара позволяет получать расчётные оценки пространственно-временной динамики опасных факторов пожара (температуры, концентрации CO) в условиях сложной аэродинамики горных выработок.

2.3. Оценка сеточной чувствительности CFD-модели пожара в горной выработке

Важным этапом верификации численной модели является анализ влияния параметров дискретизации расчетной области на результаты моделирования. Согласно рекомендациям руководства по верификации и валидации FDS, а также общепринятым стандартам в области вычислительной гидродинамики (CFD), выбор размера ячейки расчетной сетки должен основываться на достижении баланса между точностью воспроизведения физических процессов и доступными вычислительными ресурсами.

В контексте использования метода крупных вихрей (LES), применяемого в FDS, подход к оценке сеточной сходимости имеет принципиальные отличия от методов, основанных на осреднении по Рейнольдсу (RANS). В RANS-моделях при измельчении сетки ожидается

асимптотическое стремление решения к единственному точному значению (сеточная независимость). В методе LES размер ячейки сетки неявно выступает в роли ширины фильтра, отделяющего разрешаемые крупномасштабные вихревые структуры от моделируемых подсеточных. Следовательно, измельчение сетки в LES приводит к разрешению более широкого спектра турбулентных пульсаций, что делает строгую «сеточную независимость» в классическом понимании труднодостижимой для нестационарных турбулентных течений, характерных для пожаров.

В связи с этим, в рамках данной работы проводится исследование сеточной чувствительности. Целью данного анализа является определение такого размера ячейки, при котором дальнейшее измельчение сетки не приводит к статистически значимым изменениям интегральных параметров пожара (температуры, концентрации газов), оправдывающим многократный рост вычислительных затрат. Такой подход позволяет найти рациональное разрешение, обеспечивающее достаточную точность для решения задач текущего исследования.

При первоначальном выборе шага расчётной сетки использовался критерий, основанный на характеристическом диаметре пожара D^* (м). Согласно работам [35, 67], характеристический диаметр определяется выражением:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5}, \qquad (2.17)$$

где $\dot{Q}$ - мощность тепловыделения пожара, Вт, ρ - плотность воздуха, кг/м³, c_p - удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), T_0 - начальная температура, К, g - ускорение свободного падения, м/с².

Под величиной D^* понимается характерный диаметр факела для заданной мощности пожара $\dot{Q}$. Тогда безразмерное отношение $D^* / \delta x$, где δx - шаг расчётной сетки (м), показывает, сколько ячеек сетки приходится на

этот характерный размер. В ряде современных работ по тоннельным и шахтным пожарам с использованием FDS в качестве разумного диапазона, обеспечивающего надежные результаты моделирования, принимают $D^* / \delta x$ = 4…16 [38, 67].

Для среднего по интенсивности пожара мощностью $\dot{Q}$ = 3 МВт значение характеристического диаметра, вычисляемое по формуле (2.14), составляет порядка 1,5 м. С учетом геометрических параметров модели для оценки было выбрано три варианта однородной кубической сетки со значениями шага δx: 0,4 м; 0,2 м и 0,1 м. Тогда значения критерия $D^* / \delta x$ составляют около 3,8 при δx = 0,4 м; 7,5 при δx = 0,2 м и 15 δx = 0,1 м.

Таким образом, сетка с шагом 0,2 м находится близко к середине рекомендуемого диапазона, а сетка 0,1 м находится около верхней границы диапазона и может использоваться в дальнейшем как контрольная (сетка с наибольшим разрешением). Сетка 0,4 м, наоборот, дает значение формально чуть ниже нижней границы диапазона, что указывает на потенциально недостаточное разрешение зоны интенсивного горения.

Дополнительно к оценке по критерию $D^* / \delta x$ была проведена серия расчетов для трех перечисленных сеток с целью количественной оценки влияния шага сетки на результаты моделирования. Физическая постановка задачи для всех расчетов была идентичной, различался только шаг сетки δx.

Сравнение проводилось по временным рядам температуры газа и концентраций CO и CO_2. Датчики располагались с шагом 10 м в диапазоне расстояний 10…100 м от очага пожара по направлению вентиляционного потока. Временной горизонт моделирования составлял 300 с, шаг записи показаний с датчиков - 0,5 с. Для каждой величины и каждой точки сравнивались решения на сетках с шагом δx= 0,2 и 0,4 м с контрольной сеткой 0,1 м при помощи следующих метрик:

1. Нормализованная средняя абсолютная ошибка, NMAE (%), задаваемая следующим выражением:

$$\mathrm{NMAE} = \frac{100}{\overline{y^{\mathrm{ref}}}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| y_i - y_i^{\mathrm{ref}} \right|, \tag{2.18}$$

где y_i - значение температуры или концентрации газа на исследуемой сетке в i-й момент времени, y_i^{ref} - соответствующее значение на контрольной сетке, $\overline{y^{\mathrm{ref}}}$ - среднее арифметическое значение на контрольной сетке за рассматриваемый период времени, N - количество временных отсчётов (точек сравнения).

2. Коэффициент детерминации R^2 между временными рядами на исследуемой и контрольной сетках, характеризующий степень совпадения формы кривых (пики, спады, временные масштабы). Данный параметр позволяет убедиться, что выбранная сетка корректно воспроизводит пространственную структуру потока, а также локализацию максимальных значений.

Сводные результаты по средним значениям NMAE и R^2 приведены в табл. 2.2. Во всех случаях контрольной сеткой выступает сетка с $\delta x = 0{,}1$ м.

Таблица 2.2 – Средние показатели сеточной чувствительности по сравнению с контрольной сеткой (участок 10–100 м)

Параметр	**NMAE - нормализованная средняя абсолютная ошибка, % (δx = 0,2 м / 0,1 м)**	**NMAE - нормализованная средняя абсолютная ошибка, % (δx = 0,4 м / 0,1 м)**	**R^2 - коэффициент детерминации (δx = 0,2 м / 0,1 м)**	**R^2 - коэффициент детерминации (δx = 0,4 м / 0,1 м)**
Температура	5,1	8,3	0,964	0,932
CO	6,3	7,0	0,959	0,952
CO_2	6,1	6,7	0,959	0,952

Из табл. 2.2 видно, что при переходе от сетки 0,1 к 0,2 м средние значения NMAE по всем трём величинам не превышают 6,3 % при

коэффициенте детерминации R^2 ~ 0,96, то есть динамика изменения параметров на сетке 0,2 м практически не отличается от контрольной сетки. Для сетки с шагом 0,4 м относительные ошибки закономерно возрастают (до ~ 7-8 %), а значение R^2 для температуры снижается до 0,932, что указывает на снижение точности описания процесса по сравнению с шагом 0,2 м и согласуется с формально недостаточным значением критерия $D^* / \delta x \approx 3{,}7$.

Помимо точности, для практического применения модели существенное значение имеют вычислительные затраты. Уменьшение шага сетки вдвое (с 0,4 до 0,2 м и далее до 0,1 м) приводит к восьмикратному увеличению числа ячеек в трёхмерной задаче, но время расчёта растёт ещё быстрее - примерно в 18-20 раз при каждом уменьшении шага вдвое, в итоге один расчет на сетке с шагом 0,1 м может длиться десятки часов. Это связано не только с ростом числа ячеек, но и с тем, что при уменьшении шага сетки FDS автоматически снижает максимально допустимый шаг по времени в соответствии с условием Куранта-Фридрихса-Леви (CFL) [68].

Учитывая соответствие сетки с шагом 0,2 м рекомендациям по критерию $D^* / \delta x$, малые средние отклонения от контрольного решения (менее 6,3 %) и высокие значения коэффициента детерминации (R^2 > 0,95) для ключевых параметров (температура, концентрации CO и CO_2), а также существенный выигрыш в вычислительных затратах (время расчёта уменьшается примерно в 18 раз по сравнению с сеткой 0,1 м), в дальнейших расчётах в качестве рабочей сетки была принята именно она. Сетка 0,1 м использовалась только для проверки сеточной чувствительности и подтверждения того, что дальнейшее измельчение сетки не рационально с точки зрения улучшения прогноза ключевых параметров пожара в рассматриваемых постановках задачи.

2.4. Валидация CFD-модели пожара в горной выработке по экспериментальным данным

Валидация разработанной численной модели осуществлялась путем сопоставления результатов численного моделирования с независимыми экспериментальными данными. На первом этапе валидация проводилась по результатам полномасштабных огневых испытаний в горной выработке экспериментальной шахты Bierzo, в ходе которых фиксировалось распределение температуры по длине и высоте выработки при заданном режиме проветривания. Данный эксперимент представляет особый интерес, поскольку позволяет избежать неопределенностей, связанных с переносом результатов уменьшенных моделей на натурный масштаб, а также оценить способность рассматриваемой численной модели воспроизводить перенос тепла по направлению вентиляционной струи, учитывая тепловое воздействие пожара на структуру потока [37].

Огневые испытания проводились в прямолинейной выработке длиной 115 м. Очаг располагался приблизительно в 35 м от входа. В ходе эксперимента измерялась температура газовой среды в 27 контрольных точках, установленных в девяти контрольных сечениях S1–S9 (покрывающих область от -30 до 60 м относительно источника пожара) на трех уровнях, которые располагались соответственно на расстоянии 0,5; 1,0 и 2,0 м от кровли.

Расчетная область валидируемой трехмерной численной модели включала имела такую же длину 115 м и прямоугольное сечение 12 м², близкое по площади к сечениям в области расположения очага и контрольных точек. Размеры горизонтальной поверхности источника соответствовали экспериментальному поддону и составляли 1,5×1,5 м, мощность тепловыделения возрастала по квадратичному закону до принятого для эксперимента максимума 4,73 МВт. Начальный расход воздуха составлял 12,50 м³/с.

Для количественной оценки соответствия расчетных и

экспериментальных данных использовались средняя абсолютная ошибка (MAE), среднее смещение (ME), коэффициент линейной корреляции Пирсона r и нормированная средняя абсолютная ошибка (NMAE). Для всех контрольных точек использовался один и тот же временной интервал усреднения расчетных температур, охватывающий основную стадию развития пожара.

Средняя абсолютная ошибка определяется выражением:

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|X_{i,\mathrm{р}} - X_{i,\mathrm{э}}\right|, \tag{2.19}$$

где $X_{i,\mathrm{р}}$ - расчетное значение исследуемой величины в i-й точке; $X_{i,\mathrm{э}}$ - соответствующее экспериментальное значение; N - количество сравниваемых значений.

Для оценки систематического завышения или занижения расчетных значений использовалось среднее смещение:

$$\mathrm{ME} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(X_{i,\mathrm{р}} - X_{i,\mathrm{э}}\right). \tag{2.20}$$

Соответствие формы расчетного и экспериментального распределений дополнительно характеризовалось коэффициентом линейной корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_{i,\mathrm{р}} - \overline{X}_{\mathrm{р}}\right)\left(X_{i,\mathrm{э}} - \overline{X}_{\mathrm{э}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(X_{i,\mathrm{р}} - \overline{X}_{\mathrm{р}}\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(X_{i,\mathrm{э}} - \overline{X}_{\mathrm{э}}\right)^2}}. \tag{2.21}$$

где $\overline{X}_{\mathrm{р}}$ и $\overline{X}_{\mathrm{э}}$ — средние расчетное и экспериментальное значения соответственно.

В качестве основной безразмерной характеристики ошибки использовалась нормированная средняя абсолютная ошибка, определяемая относительно диапазона экспериментальных значений:

$$\mathrm{NMAE} = \frac{\mathrm{MAE}}{X_{\mathrm{э},max} - X_{\mathrm{э},min}} \cdot 100\%. \tag{2.22}$$

где $X_{\mathrm{э},max}$ и $X_{\mathrm{э},min}$ - максимальное и минимальное экспериментальные

значения в рассматриваемой выборке. Такое определение NMAE соответствует принятому далее в работе подходу к нормированию ошибок моделей машинного обучения.

По полному набору из 27 экспериментальных значений в сечениях S1–S9 нормированная средняя абсолютная ошибка составила 8,0 %, что соответствует MAE 15,7 °C. Среднее смещение составило +6,7 °C, что указывает на небольшое завышение расчетной температуры в целом, при этом коэффициент корреляции r = 0,950 свидетельствует о высокой степени воспроизведения пространственной формы температурного поля.

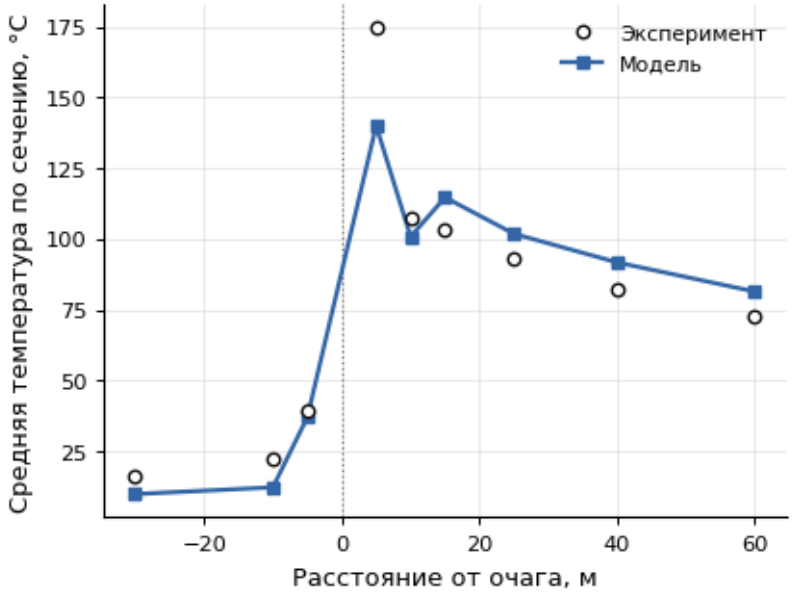

Рис. 2.1 – Сопоставление экспериментальных и расчетных профилей температуры по длине выработки (средние значения по всем уровням)

Из рисунка 2.1 также видно, что модель воспроизводит основные особенности продольного распределения температуры, включая относительно низкий уровень температуры перед очагом, резкий рост непосредственно после него с формированием максимума в сечении, расположенном через 5 м после очага и последующее снижение температуры по мере удаления от него. Наибольшее локальное расхождение наблюдается в сечении, расположенном в области формирования температурного максимума непосредственно за очагом, где расчет несколько занижает значение по сравнению с экспериментом. Данное сечение относится к

ближней зоне пожара, в которой происходит взаимодействие отклоняемого продольным вентиляционным потоком пожарного факела с подкровельный областью и формирование подкровельной струи. Температурное поле в данном случае определяется совместным действием сил плавучести и инерции потока, турбулентным вовлечением окружающего воздуха и интенсивным теплообменом, вследствие чего характеризуется выраженной пространственной неоднородностью и повышенной чувствительностью к локальным упрощениям постановки [69, 70]. При этом после данного сечения расчет хорошо воспроизводит наблюдаемое экспериментально снижение температуры по длине выработки.

На втором этапе валидации численной модели использовался эксперимент, проводившийся в уменьшенной физической модели уменьшенной физической модели протяжённой наклонной выработки тоннельного типа масштаба 1:15 длиной 50 м с прямоугольным сечением 1,0×0,5 м и углом наклона 3°. В качестве топлива использовался пропан, а мощность тепловыделения источника пожара составляла 11,48 кВт. При пересчёте по критерию подобия Фруда этим условиям соответствует полномасштабная выработка длиной 750 м с сечением 15 × 7,5 м, а указанная мощность тепловыделения соответствует значению около 10 МВт [71]. Это позволило дополнительно проверить численную модель при большей эквивалентной мощности тепловыделения пожара в условиях протяженной наклонной выработки.

В численной модели FDS воспроизводились геометрия натурной модели, очаг пожара и положения точек измерения температуры. В опыте термопары продольного профиля располагались вдоль оси выработки на расстоянии 0,01 м от кровли (0,15 м в пересчете на полный масштаб). Продольная скорость задавалась по экспериментально определенному для проводимого опыта значению 0,490 м/с, что соответствует 1,90 м/с в полном масштабе. Для сравнения использованы 18 экспериментальных значений превышения температуры над фоном, расположенных на участке до 12,5 м

после очага (до 187,5 м в полномасштабном эквиваленте). На рис. 2.2 экспериментальный и расчётный профили представлены с продольной координатой, приведённой к полному масштабу. При таком представлении значения превышения температуры над фоном не пересчитывались, поскольку при пересчёте по критерию подобия Фруда они принимаются одинаковыми для модели и полномасштабного объекта [72].

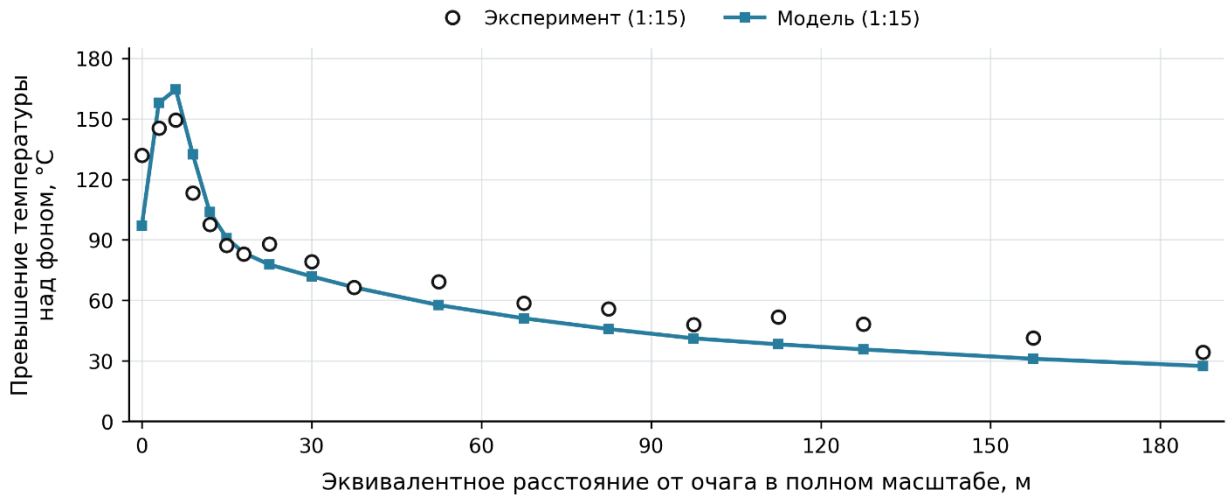

Рис. 2.2 – Сопоставление экспериментального и расчётного профилей превышения температуры над фоном по длине выработки

Нормированная средняя абсолютная ошибка для 18 пар значений составила 9,1 %, что соответствует MAE 10,5 °C. Среднее смещение также оказалось небольшим и составило −4,1 °C. Вкупе с коэффициентом корреляции r = 0,961 данные значения показывают, что рассматриваемая численная модель удовлетворительно воспроизводит характер снижения температуры в наклонной выработке по мере удаления от очага на значительные расстояния.

Для проверки корректности переноса, образующегося при горении монооксида углерода (CO), для рассматриваемой численной модели использовались данные полномасштабного опыта в экспериментальной угольной шахте NIOSH Safety Research Coal Mine [35]. В ходе данного опыта сжигали 5,7 л дизельного топлива в поддоне размером 0,6 × 0,6 м. Станция с датчиком CO вблизи кровли находилась в 75 м от очага по направлению вентиляционного потока и согласно результатам измерений максимум

концентрации на ней составлял 39 ppm.

В численной модели FDS было задано соответствующее прямоугольное сечение 3 × 2 м и длина расчётной области 84 м, источник пожара располагался в 8 м от входа, точка измерения концентрации CO в 75 м за ним, на высоте 1,9 м. Геометрия источника пожара соответствовала размеру экспериментального поддона. Скорость вентиляционного потока на входе задавалась равной экспериментальным 0,71 м/с, а предельная мощность тепловыделения пожара соответствовала расчетной оценке около 500 кВт. Для расчета было задано модельное топливо с теплотой сгорания 42,6 МДж/кг и выходом CO 0,015 кг/кг.

На рис. 2.3 приведено сравнение экспериментальной кривой зависимости концентрации CO от времени и результата расчета численной модели.

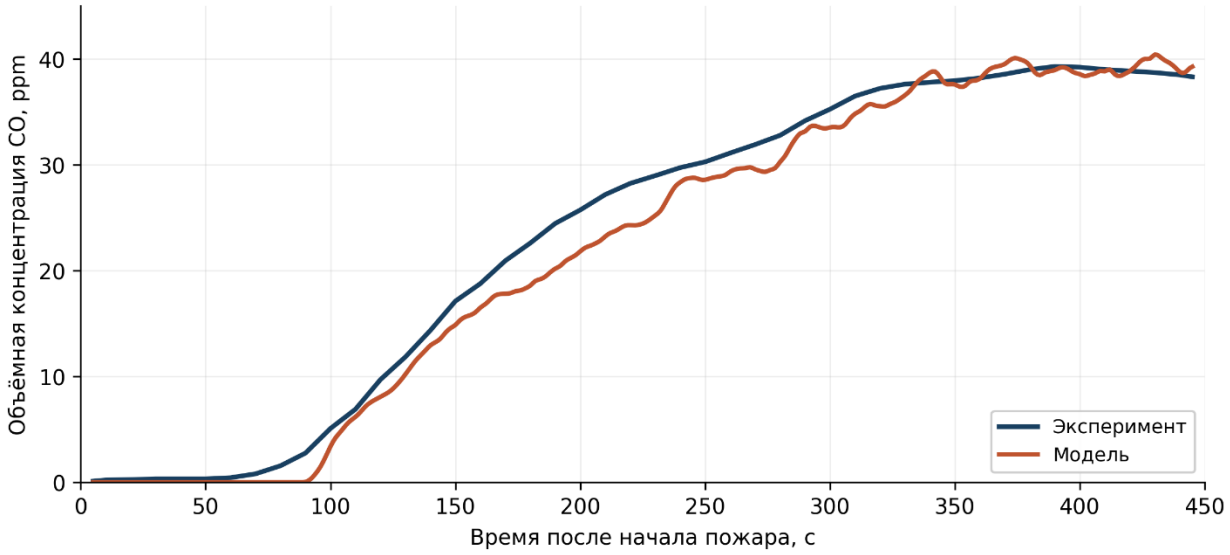

Рис. 2.3 – Изменение экспериментальной и расчётной концентрации CO в выработке шахты на удалении от источника пожара

Полученный при расчете максимум концентрации CO составляет около 40 ppm, что довольно близко к экспериментальному максимуму 39 ppm. При этом нормированная средняя абсолютная ошибка между значениями на интервале 10-445 с составляет 4,0 %, что соответствует MAE 1,57 ppm, при этом коэффициент корреляции Пирсона r составляет 0,995. Таким образом, расчет удовлетворительно воспроизводит динамику и уровни концентрации

CO, включая максимальную концентрацию в развитой стадии пожара.

Таким образом, валидация численной модели проведена по трём независимым экспериментальным наборам данных, включающим два полномасштабных огневых опыта в горных выработках и эксперимент на физической модели наклонной выработки масштаба 1:15. Во всех рассмотренных случаях нормированная средняя абсолютная ошибка (NMAE) не превышала 9,1 %, а коэффициент корреляции Пирсона находился в диапазоне 0,950–0,995. Полученная степень согласования подтверждает способность принятой численной модели воспроизводить основные закономерности переноса тепла и оксида углерода в условиях пожара и обосновывает её применение для проведения параметрических численных экспериментов и формирования обучающего набора данных для моделей машинного обучения.

Выводы по главе

1. Для задач настоящего исследования целесообразным является применение подхода вычислительной динамики жидкости и газа, поскольку в отличие от сетевых моделей вентиляции, CFD-модели позволяют получить подробные данные о нестационарном пространственно-временном распределении температуры, концентрации продуктов горения и газодинамических параметров на рассматриваемом аварийном участке. Такая детализация необходима для исследования влияния вентиляционного потока, угла наклона выработки и параметров очага пожара на распространение опасных факторов пожара по выработке, а также для расчёта значений температуры и концентрации CO в заданных точках с учётом трёхмерных эффектов тепломассопереноса.

2. Принятая физико-математическая постановка CFD-моделирования позволяет учитывать основные процессы, определяющие развитие пожарной обстановки в протяжённой горной выработке, включая перенос теплоты и продуктов горения вентиляционным потоком, действие сил плавучести и

турбулентное перемешивание. Это обеспечивает возможность формирования набора физически обоснованных расчетных данных в рамках параметрического моделирования и анализа закономерностей распространения температуры и концентрации CO при изменении условий проветривания, динамики развития пожара и геометрических параметров выработки.

3. В ходе оценки сеточной чувствительности модели было показано, что расчетная сетка с шагом 0,2 м обеспечивает высокую степень согласованности с контрольным решением: для температуры и концентрации CO среднее значение нормализованной средней абсолютной ошибки (NMAE) не превышает 6,3 %, а коэффициент детерминации составляет около 0,96. При этом переход к сетке с шагом 0,2 м позволяет на порядок сократить вычислительные затраты, что делает её рациональным выбором для серийных расчетов при заданных параметрах модели.

4. Проведена валидация принятой CFD-модели по трём независимым экспериментальным наборам данных, включающим два полномасштабных огневых опыта и эксперимент на физической модели наклонной выработки масштаба 1:15. При сопоставлении пространственных распределений температуры и временной динамики концентрации CO нормированная средняя абсолютная ошибка (NMAE) не превышала 9,1 %, а коэффициент корреляции Пирсона r составлял 0,950-0,995. Полученные результаты подтверждают пригодность принятой численной модели для решения задач настоящего исследования, включая параметрическое моделирование распространения температуры и CO в горных выработках и формирование на его основе обучающего набора данных для моделей машинного обучения.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДИНАМИКУ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОЖАРАХ В ШАХТЕ

3.1. Факторы, влияющие на развитие пожара в шахте

Развитие пожара в угольной шахте представляет собой сложный, динамический и многофакторный процесс, определяемый совокупным влиянием ряда взаимосвязанных факторов, тщательное изучение и учет которых очень важны для получения достоверных результатов моделирования.

Одним из основных факторов, влияющих на развитие пожара, является величина пожарной нагрузки. Пожарная нагрузка определяется количеством горючих материалов в шахте, включая уголь, деревянные конструкции и оборудование. Вариативность пожарной нагрузки, обусловленная различиями в физико-химических свойствах углей различных марок, а также неоднородностью распределения горючих материалов, является фактором, определяющим потенциальную величину пожарной опасности. Физико-химические свойства материалов, такие как теплотворная способность, температура воспламенения и особенности распространения горения также играют существенную роль.

Состав рудничной атмосферы, влажность, давление и температура относятся к важным параметрам, определяющим условия горения. Высокая влажность может замедлить распространение пожара за счет повышения тепловой емкости воздуха и материалов, тогда как сухие условия способствуют быстрому воспламенению и распространению огня. Давление и температура воздуха в шахте также могут влиять на интенсивность горения. Например, пониженное давление может уменьшить количество доступного кислорода, замедляя горение, в то время как высокая температура способствует более быстрому возгоранию материалов [73].

Ключевую роль в распространении опасных факторов пожара играют параметры вентиляции, такие как направление и скорость воздушного

потока. От скорости воздушного потока зависит интенсивность конвективного переноса теплоты и продуктов горения, степень их разбавления свежим воздухом, характер температурной стратификации, а также возможность распространения дыма против направления основного вентиляционного потока. При недостаточной скорости вентиляции возможно образование обратного распространения дыма в подкровельной области, тогда как при увеличении скорости воздушного потока усиливается вынос нагретых продуктов горения по выработке и изменяется продольное распределение температуры [74-78]

Одной из особенностей подземных пожаров является интенсивный теплообмен с массивом горных пород, окружающим выработку. За счет теплоемкости пород часть теплоты, выделяющейся при пожаре, аккумулируется стенками выработки, что влияет на температурный режим, продолжительность охлаждения аварийного участка и условия ликвидации пожара. При этом степень такого влияния зависит от теплофизических свойств пород, продолжительности пожара, мощности источника тепловыделения и параметров вентиляционного потока.

Существенное влияние на распространение тепла и продуктов горения оказывают геометрические характеристики горных выработок, в том числе площадь, форма поперечного сечения и угол наклона. Эти параметры определяют условия движения вентиляционного потока, распределение температуры и взаимодействие нагретых газов с окружающими поверхностями.

Кроме того, в наклонных выработках движение воздуха может существенно меняться вследствие образования тепловой тяги, способной увеличивать скорость движения воздуха или наоборот приводить к снижению устойчивости проветривания, вплоть до опрокидывания вентиляционной струи при нисходящем движении воздух. Изменение режима проветривания в одной выработке может отражаться и на воздухораспределении в смежных участках вентиляционной сети, что

приводит к дополнительной опасности [79].

Таким образом, развитие пожара в угольной шахте определяется совокупным влиянием ряда взаимосвязанных факторов, связанных в том числе с условиями проветривания и геометрией горных выработок. Поэтому при анализе пожарной обстановки важно учитывать не только параметры самого очага пожара, но и условия переноса теплоты и продуктов горения по выработке.

3.2. Оценка влияния угла наклона выработки на распределение факторов пожара

В практических условиях контроль и прогнозирование развития пожара в горных выработках в значительной степени опираются на данные стационарных средств мониторинга, прежде всего газоанализаторов и температурных датчиков, установленных на ограниченном числе пунктов и, как правило, на фиксированных высотах. При этом регистрируемые ими значения формируются не только интенсивностью источника пожара и режимом вентиляции, но и особенностями газодинамики потока в выработке, включая действие сил плавучести и степень поперечного перемешивания, что определяет скорость продвижения продуктов горения и характер вертикальной неоднородности параметров газовой среды.

Одним из факторов, способных существенно изменять указанные механизмы переноса и, следовательно, интерпретацию показаний датчиков, является продольный уклон выработки. В наклонных выработках продольная составляющая термогравитационных сил может как усиливать, так и ослаблять перенос нагретых и загрязнённых газов по направлению вентиляционного потока, влияя на устойчивость подкровельного дымового слоя, на времена достижения пороговых значений концентрации и температуры и на различия показаний между верхней и нижней зонами сечения. В связи с этим целью настоящего раздела является количественная оценка влияния угла наклона выработки на распределение основных факторов пожара, определяющих измеряемые датчиками значения, включая

кинематику продвижения фронта CO и теплового фронта, а также формирование стратификации по температуре и концентрации монооксида углерода при фиксированных параметрах пожара и вентиляции.

Для достижения поставленной цели выполнена серия расчётов для типовой геометрии выработки и заданного режима вентиляции, в рамках которой варьировался продольный уклон в диапазоне, характерном для угольных шахт, после чего анализировались времена прибытия пороговых уровней и показатели вертикальной неоднородности параметров газовой среды вдоль выработки.

Расчёты проводились для пожара в выработке прямоугольного сечения высотой 2,4 м, шириной 3,2 м и длиной моделируемого участка 124 м. На входной границе (x = -22,0 м) задавалась скорость вентиляционного потока 1,5 м/с, а на выходной границе (x = 102,0 м) устанавливалось условие свободного выхода («OPEN»), минимизирующее влияние выходного сечения на структуру течения внутри рассматриваемого участка. Источник пожара задавался как площадной очаг размером 2,4×2,4 м (площадью 5,76 м^2) с удельным тепловыделением 521 кВт/м^2, что обеспечивает заданный максимум 3 МВт. Выбор данных параметров не привязан к конкретному типу пожарной нагрузки (конвейерная лента, кабели, узел электрооборудования, угольная насыпь), а отражает обобщённую интенсивность развитых экзогенных пожаров в горных выработках. Динамика роста тепловыделения на начальной стадии задавалась по квадратичному закону (t-squared fire) с временем выхода на пиковую мощность (3 МВт) равным 60 с, после чего тепловыделение поддерживалось постоянным. В качестве горючей нагрузки использовались характеристики модельного топлива с теплотой сгорания 25 МДж/кг [80, 81].

Далее были выполнены расчёты для серии углов наклона выработки при заданной пиковой мощности тепловыделения $\dot{Q}_{\max}$ = 3 МВт и фиксированной скорости вентиляционного потока 1,5 м/с с целью количественной оценки влияния вклада продольного уклона на скорость

продвижения фронта угарного газа и теплового фронта по выработке, а также формирования стратификации по концентрации CO и температуре. Исследовался диапазон углов наклона от -20 до 20 градусов (положительный угол соответствует подъёму выработки по направлению вентиляционного потока), характерный для выработок угольных шахт [82].

Под временем прибытия фронта понимался момент первого достижения заданного порога концентрации монооксида углерода (CO), составляющего 20 ppm и соответствующего рабочему диапазону измерений промышленных газоанализаторов [83] и, соответственно, момент первого превышения значения температуры над фоном на $\Delta T = 5$ K.

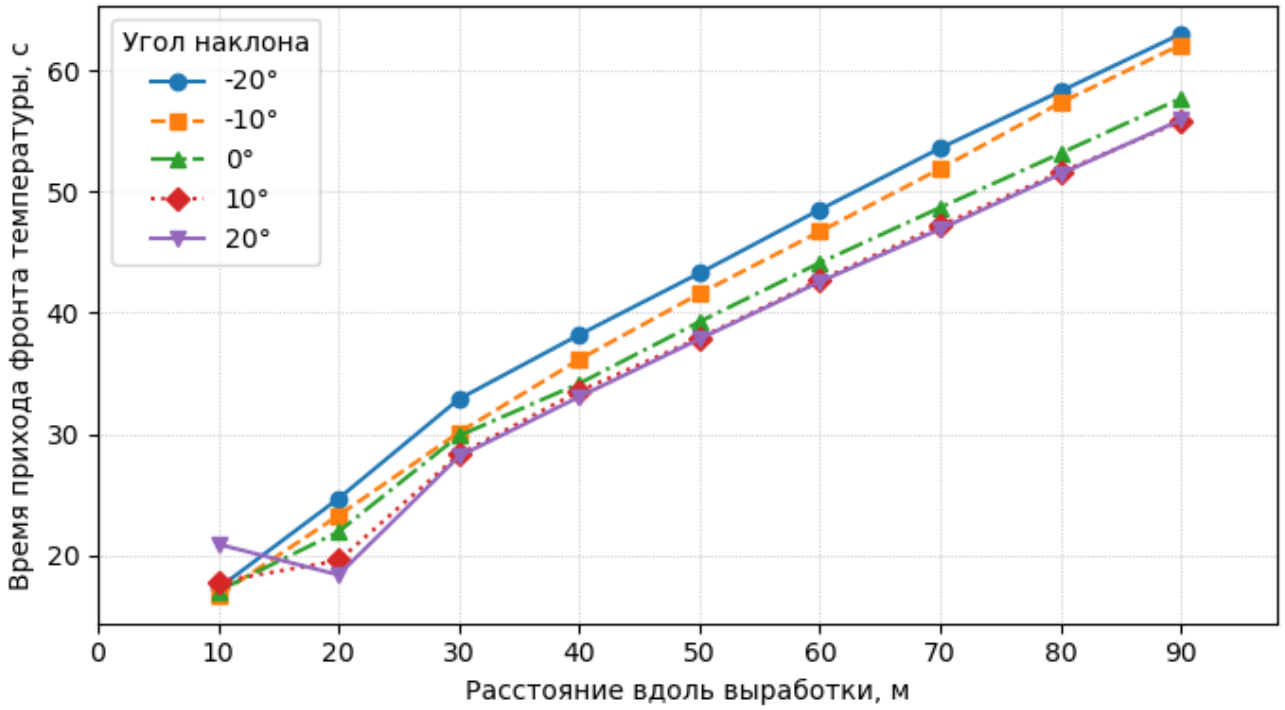

Рис. 3.1 – Зависимость времени прибытия теплового фронта от расстояния вдоль выработки при различных углах наклона

Согласно рис. 3.1 и 3.2, начиная с расстояния x = 30 м от источника пожара, зависимости времени прибытия для фронта CO и температуры становятся близки к линейным, что указывает на установление практически постоянной эффективной скорости распространения фронта вдоль выработки. В то же время, зона вблизи очага представляет собой область гидродинамического формирования потока, характеризующуюся высокой

амплитудой турбулентных пульсаций и сложной структурой вихреобразования, что объясняет наблюдаемую нелинейность. Верхняя граница (x = 90 м) была выбрана с целью минимизации влияния граничных эффектов на результаты, поскольку вблизи открытой границы наблюдается локальная перестройка полей давления и скорости, которая может привести к искажению расчетных метрик.

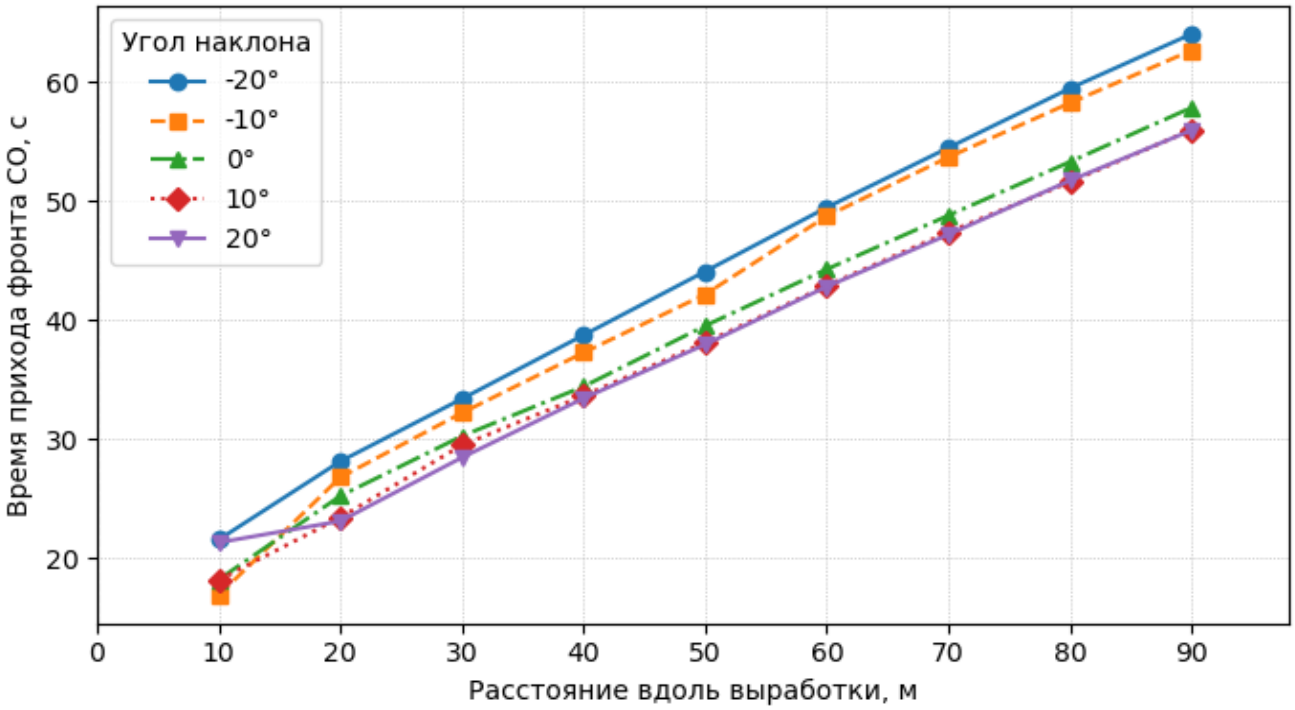

Рис. 3.2. – Зависимость времени прибытия фронта монооксида углерода от расстояния вдоль выработки при различных углах наклона

Полученные данные показывают систематическое влияние уклона на времена прибытия фронта CO и теплового фронта. При отрицательном значении угла наклона θ = -20° среднее время прибытия фронта в области 30-90 м увеличивается на 11,4% для CO и на 10,0% для температуры относительно горизонтального случая, а при θ = -10° данный показатель увеличивается на 8,6% и 6,2% соответственно. Иными словами, даже в условиях, при которых не формируется выраженный обратный поток нагретых газов, отрицательный продольный уклон способен заметно изменять кинематику их распространения. Напротив, при положительных углах наклона θ = 10…20° наблюдается умеренное уменьшение времен

прибытия фронта на 3-4%.

Наблюдаемая асимметрия по знаку (замедление при отрицательном уклоне заметно сильнее, чем ускорение при положительном) может быть объяснена тем, что при фиксированной скорости вентиляционного потока положительный уклон лишь частично увеличивает продольную тягу, тогда как отрицательный уклон создаёт противодействующий термогравитационный вклад, влияющий на формирование и устойчивость подкровельного дымового слоя и на эффективное перемешивание по сечению.

Для анализа вертикальной неоднородности параметров газовой среды была использована мера стратификации, выражающаяся как разность средних по времени значений параметров на двух высотах: $z_в$ = 2,2 м (верхний уровень, у кровли) и $z_н$ = 1,0 м (нижний уровень). В квазистационарном интервале времени 120-300 с (после достижения источником пожара постоянной мощности) рассчитывались следующие величины: $\Delta T(x,\theta) = \bar{T}(x,z_в) - \bar{T}(x,z_н)$ и $\Delta\mathrm{CO}(x,\theta) = \overline{\mathrm{CO}}(x,z_в) - \overline{\mathrm{CO}}(x,z_н)$, где $\bar{T}$ и $\overline{\mathrm{CO}}$ - средние по времени значения температуры и объемной концентрации монооксида углерода на данном интервале.

На рис. 3.3 и 3.4 показаны распределения ΔT и ΔCO вдоль выработки для нескольких характерных углов. Во всех случаях наблюдается максимальная неоднородность в ближней зоне (около 10 м от очага), поскольку на этом участке формируется подкровельный дымовой слой. Далее, в окрестности точки x = 20 м обе величины демонстрируют значительный спад, отражающий снижение уровня стратификации, после которого начинаются различия в картине неоднородности, в зависимости от исследуемого параметра. В связи с этим на участке 20-90 м были дополнительно рассмотрены следующие сводные характеристики: среднее значение исследуемой величины $\langle\Delta\rangle$ и максимальное значение Δ_{max}, с указанием координаты её достижения (табл. 3.1).

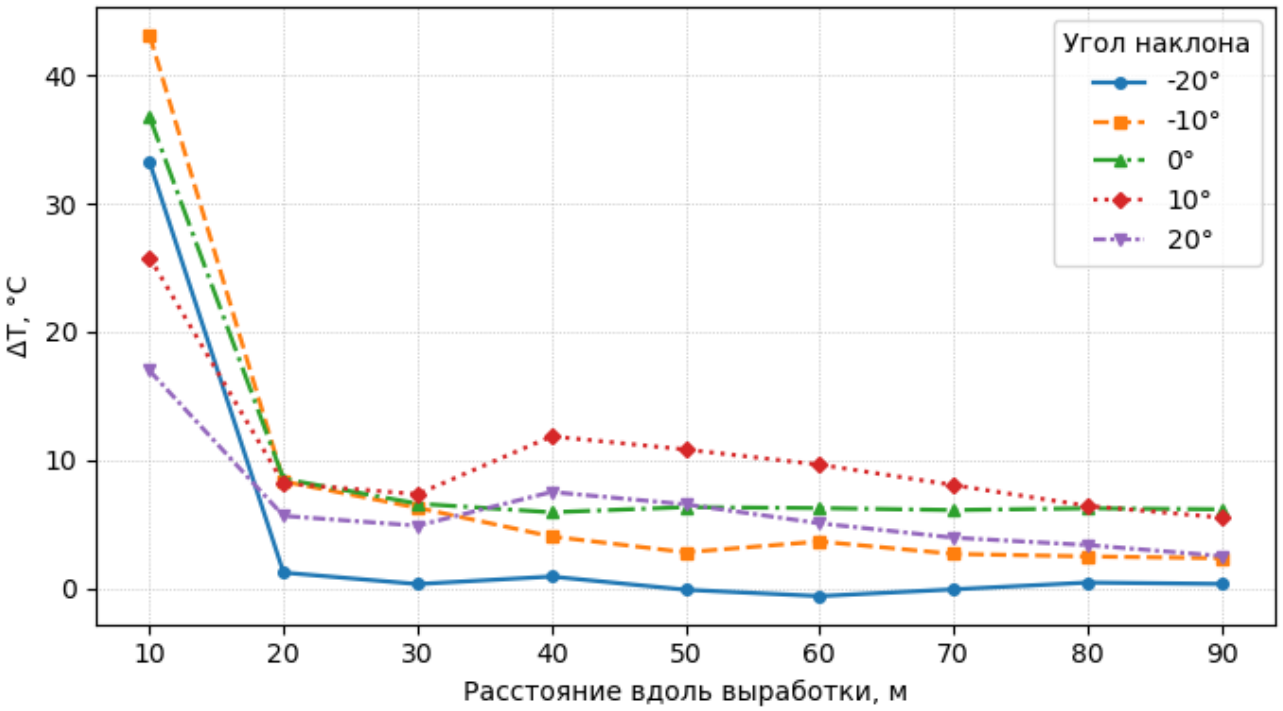

Рис. 3.3 – Вертикальная неоднородность температуры вдоль выработки

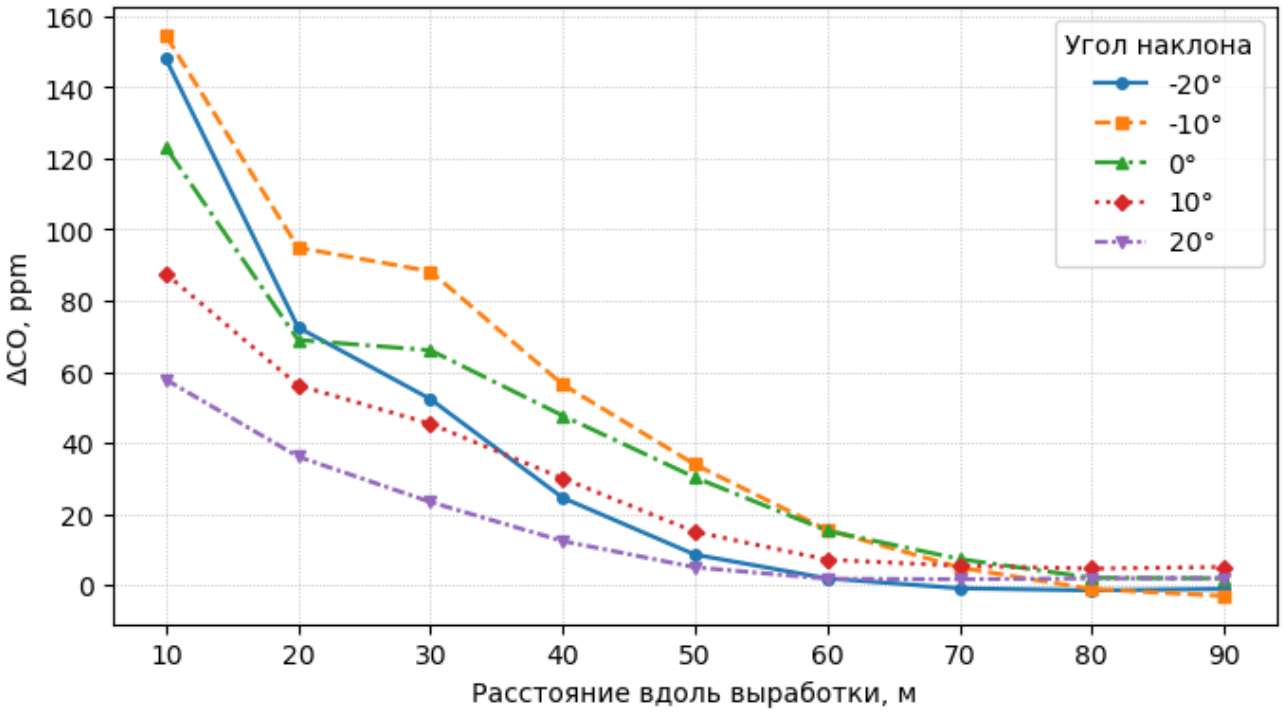

Рис. 3.4 – Вертикальная неоднородность концентрации CO вдоль выработки

Таблица 3.1 – Сводные показатели вертикальной неоднородности температуры и CO (20–90 м)

Угол наклона θ, °	**⟨ΔT⟩ - средняя температурная стратификация, °C**	**ΔT_{max} - максимальная температурная стратификация, °C (x_{max}, м)**	**⟨ΔCO⟩ - средняя стратификация CO, ppm**	**ΔCO_{max} - максимальная стратификация CO, ppm (x_{max}, м)**
-20	0,29	1,21 (20)	19,56	72,47 (20)
-15	2,40	6,17 (20)	30,40	100,69 (20)
-10	4,06	8,32 (20)	36,23	94,87 (20)
-5	5,12	8,12 (30)	38,40	88,06 (30)
0	6,50	8,52 (20)	29,94	68,92 (20)
+5	10,25	11,89 (60)	34,08	71,94 (20)
+10	8,47	11,84 (40)	21,12	56,18 (20)
+15	6,15	9,76 (40)	15,93	48,66 (20)
+20	4,92	7,50 (40)	10,54	36,12 (20)

Приведенные данные показывают, что тепловая стратификация максимальна при умеренном положительном наклоне. Например, средняя величина ⟨ΔT⟩ при угле наклона выработки θ = 5° заметно возрастает с 6,50 до 10,25 °C (примерно на 58%) по сравнению с горизонтальным случаем, и при дальнейшем увеличении угла убывает, возвращаясь к значениям, близким к горизонтальному случаю при θ = 15°.

В дополнение к этому, при отрицательных значениях угла наклона наблюдается постепенное снижение стратификации, вплоть до θ = -20°, при котором наблюдается практически полное исчезновение температурной разницы между верхней и нижней зонами выработки.

Отдельного внимания заслуживает качественное различие профилей ΔT и ΔCO. Профили стратификации по монооксиду углерода демонстрируют монотонное снижение по мере удаления от очага возгорания (рис. 3.4), что свидетельствует о необратимом характере турбулентной диффузии, приводящей к плавному выравниванию концентрационного слоя. При этом, наибольшие средние значения ⟨ΔCO⟩ наблюдаются при умеренных отрицательных углах θ = -5°…-15°, с максимумом при наклоне θ = -5° и постепенном снижении при дальнейшем уменьшении угла.

Данные по распределению температурной разности ΔT, напротив, демонстрируют наличие локального максимума при положительных углах наклона при x = 40…60 м, после которого наблюдается медленный спад (рис. 3.3). Наблюдаемый максимум обусловлен, по всей видимости, стабилизирующим действием сил плавучести, продольная составляющая которых сонаправлена с вентиляционным потоком, что способствует более устойчивому переносу нагретых газов у кровли и подавлению вертикального турбулентного перемешивания [84].

Таким образом, результаты расчётов показывают, что продольный уклон выработки является фактором, напрямую определяющим характер регистрируемых датчиками изменений температуры и концентрации CO и, следовательно, должен рассматриваться как один из ключевых параметров при построении моделей прогнозирования развития пожара в наклонных выработках. Установлено, что изменение угла наклона приводит к систематическому смещению времен достижения пороговых значений, используемых в практике газоаналитического и температурного контроля, а также к изменению эффективной скорости распространения характерных фронтов вдоль выработки; при этом влияние уклона носит асимметричный по знаку характер, что связано с различием роли термогравитационных сил при подъёме и спуске выработки по направлению вентиляционного потока.

Существенно также, что уклон изменяет степень вертикальной неоднородности газовой среды, определяя устойчивость и протяжённость подкровельного слоя и эффективность поперечного перемешивания, вследствие чего показания датчиков оказываются чувствительными не только к интенсивности пожара и условиям вентиляции, но и к высоте установки измерительных пунктов и их расположению относительно зоны максимальной стратификации.

В этих условиях применение прогнозных алгоритмов, основанных на интерпретации временных задержек и уровней измеряемых параметров без учёта продольного уклона, может приводить к систематическим ошибкам в

оценке динамики распространения продуктов горения и теплового воздействия, а также к неверной идентификации режимов переноса. Следовательно, учёт угла наклона выработки и обусловленной им стратификации должен быть интегрирован в структуру моделей прогнозирования и процедуры интерпретации данных мониторинга как необходимое условие повышения достоверности прогноза и корректности сопоставления показаний датчиков в выработках с различной геометрией.

3.3. Анализ закономерностей изменения температуры и концентрации CO в горной выработке

Для выявления характерных особенностей пространственно-временного изменения температуры и концентрации CO первоначально рассмотрен один из расчетных сценариев с длиной моделируемого участка 230 м, и временем достижения Q_{peak}= 3 МВт, составляющем 120 секунд. В рамках численного эксперимента фиксировалась температура и концентрация CO под кровлей, на высоте 2,2 м в диапазоне расстояний от очага x = 10…200 м с шагом 10 м.

На рис. 3.5 показаны зависимости приращения температуры ΔT_0 от времени в точках измерения над фоном T_0 = 20 °C при разных значениях расстояния от источника пожара x.

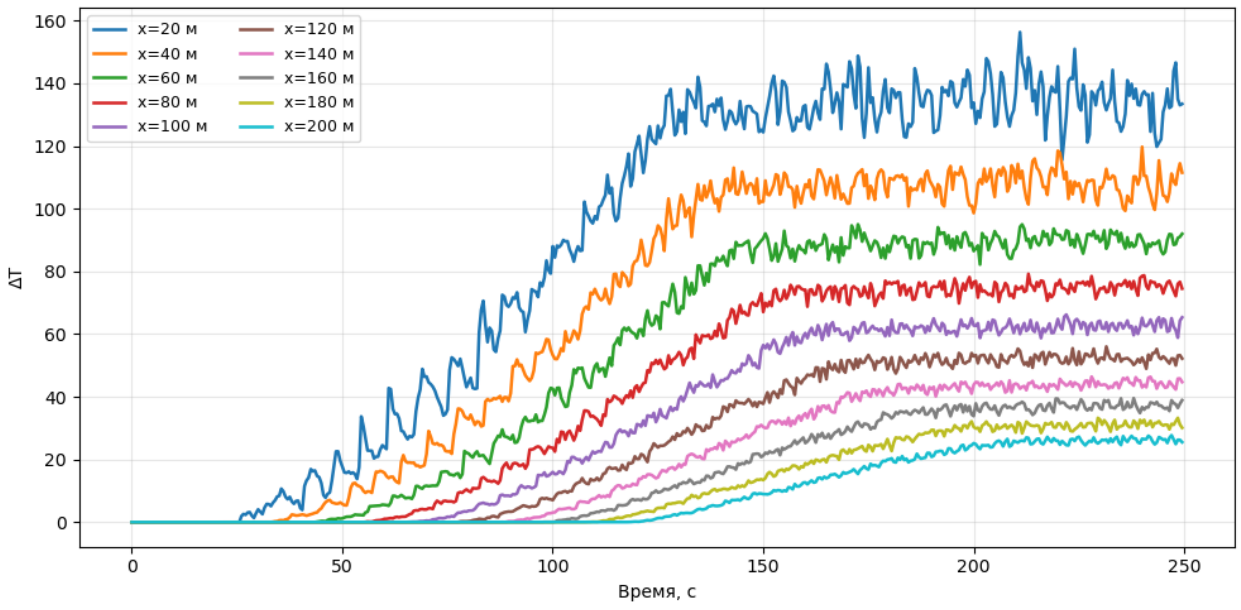

Рис. 3.5 – Приращение температуры ΔT(t) над фоном у кровли

Из графика видно, что увеличением расстояния монотонно снижается как среднее значение фиксируемой датчиком температуры, так и угол наклона участка кривой температуры, соответствующего фазе роста концентрации до установившегося максимума.

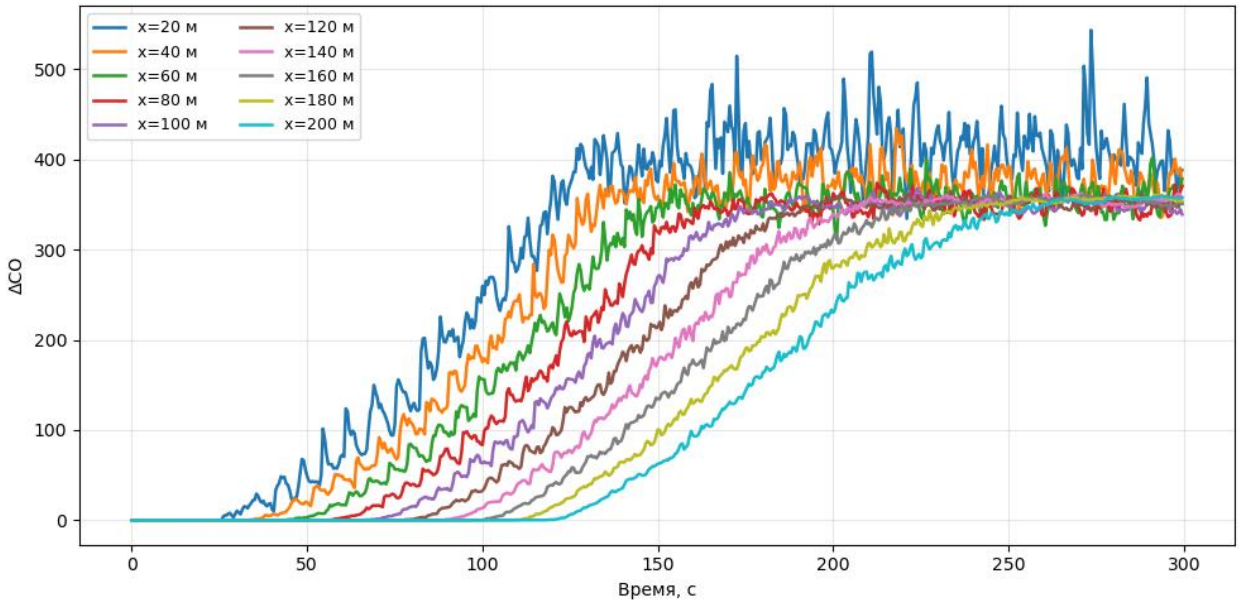

Рис. 3.6 – Приращение концентрации ΔCO(t) у кровли

С концентрациями CO наблюдается иная ситуация, для них характерен более долгий период достижения максимальных значений, например, значения ΔCO(t) на расстоянии от очага x = 200м, достигают максимальных значений только по истечении 270 секунд от начала пожара. Стоит отметить, что при удалении от очага $x > 60$ м все кривые выходят примерно на один и тот же уровень максимальных концентраций. Это согласуется с ранее полученными данными о снижении вертикальной стратификации CO при таком удалении от источника пожара, причиной которой является турбулентная диффузия. Иными словами, при малом удалении от источника пожара у кровли регистрируется большая концентрация CO из-за формирования подкровельного слоя, но по мере снижения температурной стратификации (поддерживающей слой) и вследствие турбулентного перемешивания концентрация монооксида углерда постепенно выравнивается, пока не достигает величины, близкой к равновесной при

данных параметрах.

По результатам осреднения на интервале 300-500 с установлено, что среднее приращение температуры ΔT монотонно уменьшается с увеличением расстояния от источника пожара. В рассматриваемом случае значение ΔT снижается от величин порядка 160 °C в ближней к очагу области до величин порядка 30 °C на расстоянии около 200 м. При этом даже на значительном удалении от источника пожара температурный сигнал остается отличимым от фонового уровня, что говорит о сохранении его информативности.

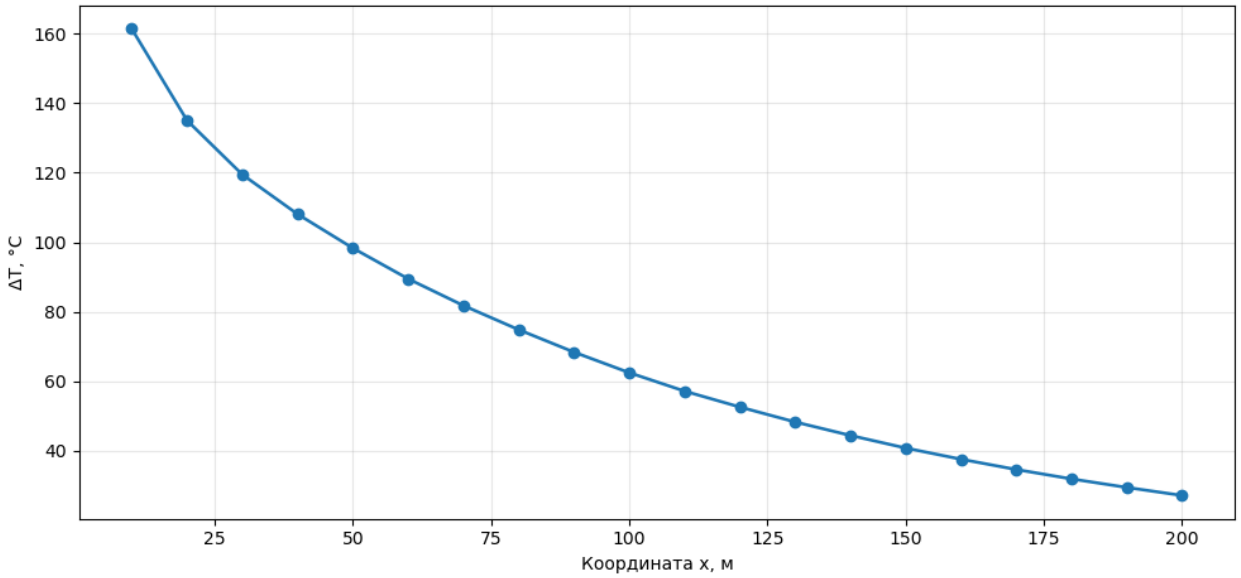

Рис. 3.7 – Изменение среднего приращения температуры над фоном ΔT по длине выработки

Пространственное распределение среднего значения ΔCO на интервале 300–500 с не является монотонно убывающим на всем диапазоне расстояний. В ближней области происходит заметное снижение концентрации: от значений порядка 435-440 ppm около источника до 350 ppm на расстоянии около 80-90 м. Далее концентрация изменяется слабо и выходит на близкий к постоянному уровень. Такой характер распределения может быть связан с постепенным разрушением подкровельного слоя продуктов горения и выравниванием концентрации CO по сечению выработки вследствие турбулентной диффузии и перемешивания вентиляционным потоком [85].

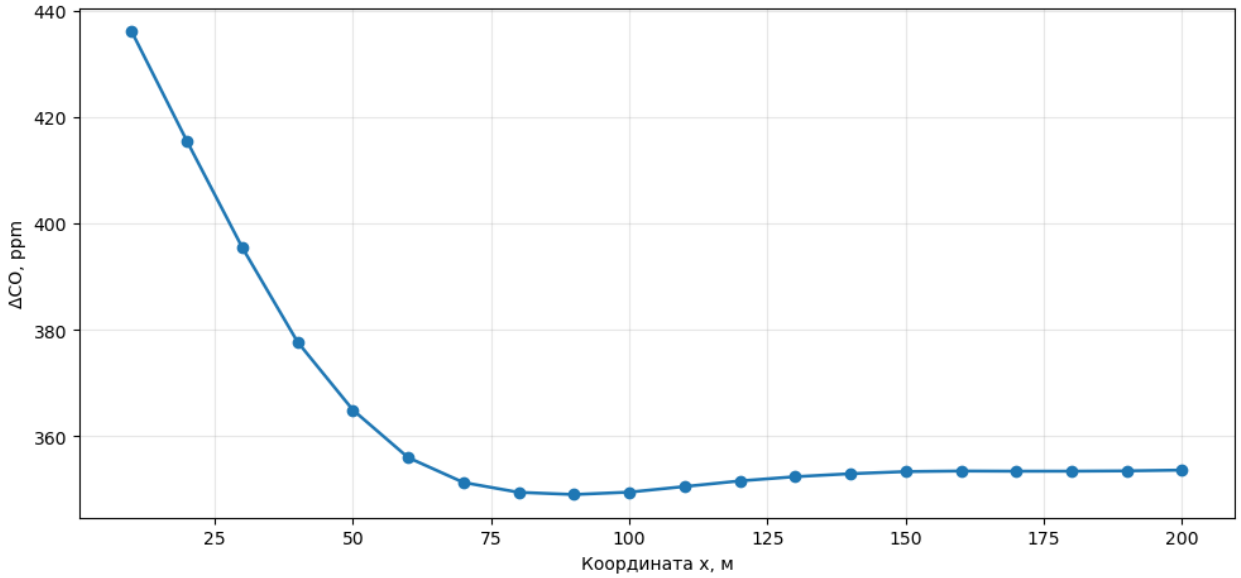

Рис. 3.8 – Изменение среднего приращения концентрации оксида углерода ΔCO по длине выработки

Полученные результаты показывают, что температура и концентрация CO несут различную информацию о пожаре. Температура сохраняет выраженный продольный градиент на всем исследуемом участке и поэтому является информативным параметром для оценки расстояния до очага. Концентрация CO в большей степени характеризует перенос продуктов горения и сохраняет информацию о наличии пожара на больших расстояниях от очага, где температурные градиенты становятся менее выраженными. Следовательно, совместное использование температуры и концентрации CO позволяет повысить информативность измерительной системы по сравнению с использованием только одного типа датчиков.

Дополнительно исследовано влияние заданной скорости вентиляционного потока на продольный профиль температуры. На первом этапе аппроксимация выполнялась для скоростей вентиляционного потока V = 1,0-2,0 м/с. В данном диапазоне скоростей среднее превышение температуры над фоном монотонно убывает при удалении от источника пожара и удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью [86, 87]:

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_r} = e^{-\beta(x-x_r)} \qquad (3.1)$$

где ΔT_x – среднее значение превышения температуры над фоном в точке, расположенной на расстоянии x от начала координат; ΔT_r – среднее превышение температуры в опорной точке; x – расстояние от начала координат; x_r – расстояние от опорной точки до начала координат; β – коэффициент температурного затухания.

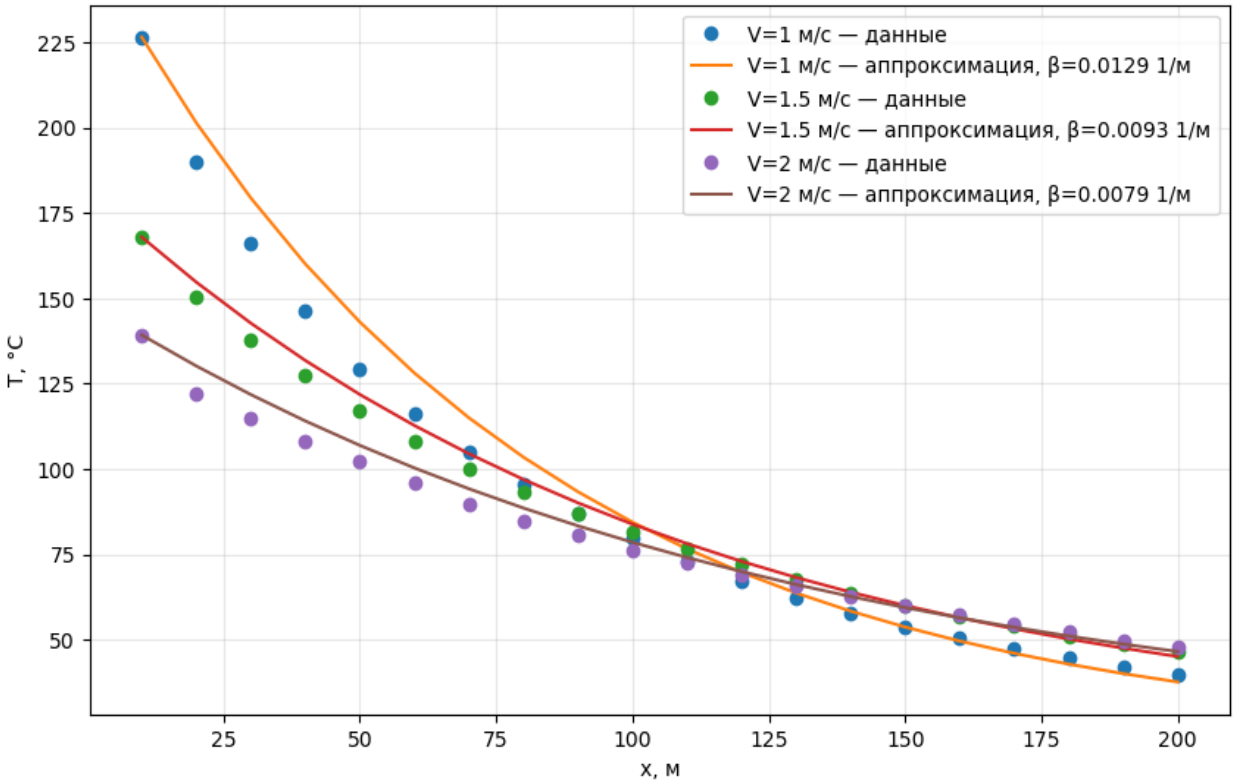

Рис. 3.9 – Аппроксимация продольного распределения температуры при V = 1,0-2,0 м/с

Для рассматриваемых скоростей в качестве опорной принята точка x_r = 10 м от очага пожара. Полученные значения коэффициента детерминации R^2 = 0,980-0,993 показывают, что простая экспоненциальная зависимость достаточно точно описывает продольное затухание температуры в диапазоне V = 1,0-2,0 м/с.

С увеличением скорости вентиляционного потока от 1 до 2 м/с значение ΔT_r уменьшается, что указывает на снижение температуры в ближней к очагу области вследствие более интенсивного разбавления и выноса теплоты (табл. 3.2). Одновременно снижается коэффициент β, то есть

относительное затухание температуры по длине становится менее резким. Это может быть объяснено тем, что при большей скорости вентиляционного потока нагретые продукты горения быстрее переносятся вдоль выработки, вследствие чего температурный след пожара распространяется на большее расстояние при меньших максимальных температурах вблизи очага.

Таблица 3.2 – Параметры экспоненциальной аппроксимации продольного затухания температуры при V = 1,0-2,0 м/с

Скорость вентиляционного потока, м/с	x_r, м	ΔT_r, °C	β, м$^{-1}$	R^2
1,0	10	206,48	0,0129	0,9797
1,5	10	147,94	0,0093	0,9933
2,0	10	119,27	0,0079	0,9811

Для скоростей вентиляционного потока V = 2,5-5,0 м/с характер продольного температурного профиля изменяется. В ближней к очагу области наблюдается более резкое снижение температуры, а при отдельных скоростях максимум средней температуры смещается с точки x = 10 м на точку x = 20 м. Кроме того, относительно быстрое снижение температуры на начальном участке по мере удаления от очага сменяется более пологим затуханием. В связи с этим простая экспоненциальная аппроксимация становится недостаточной.

Для описания нисходящей части температурных профилей на исследованном участке выработки при V = 2,5-5,0 м/с может быть использована экспоненциальная зависимость с остаточным смещением:

$$\Delta T_x = \Delta T_s + \left(\Delta T_p - \Delta T_\text{s}\right)e^{-\beta(x-x_p)} \qquad (3.2)$$

где ΔT_s - остаточный уровень превышения температуры в дальней области выработки; ΔT_p - максимальное среднее превышение температуры над фоном; x_p - координата точки, в которой достигается максимум средней температуры; β - коэффициент температурного затухания.

Физически наличие ненулевого значения ΔT_s связано с сохранением

остаточного теплового воздействия пожара в дальней области выработки. При повышенных скоростях вентиляционного потока происходит интенсивный перенос нагретых продуктов горения, что приводит к снижению температуры в ближней зоне и одновременному сохранению заметного превышения температуры над фоном на удалении от очага.

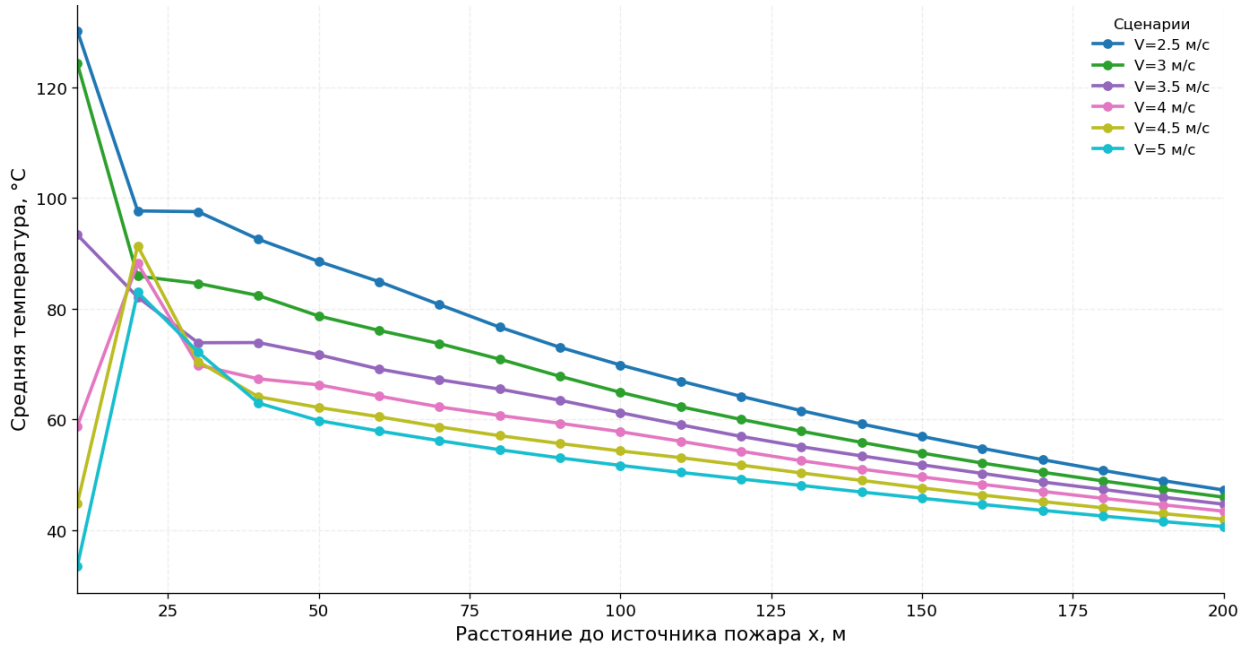

Рис. 3.10 – Профили продольного распределения температуры при V = 2,5-5,0 м/с

Таким образом, результаты численного эксперимента показывают, что продольное распределение температуры в горной выработке зависит от скорости вентиляционного потока не только количественно, но и качественно. При умеренных скоростях V = 1,0-2,0 м/с температурное затухание может быть описано простой экспоненциальной зависимостью. При повышенных скоростях V = 2,5-5,0 м/с более адекватной является модель с остаточным смещением, учитывающая остаточное превышение температуры в дальней области выработки и возможное смещение положения максимума температуры по направлению потока.

Полученные закономерности подтверждают, что показания температурных датчиков содержат информацию не только о наличии пожара,

но и о расстоянии до очага, скорости вентиляционного потока и характере переноса теплоты по выработке. Это обосновывает использование пространственно-распределенных температурных признаков при формировании обучающего набора данных для модели оперативной оценки параметров и прогнозирования опасных факторов пожара.

3.4. Определение сценариев развития пожаров в горных выработках для численного моделирования

Для корректной постановки сценариев пожара при численном моделировании требуется рассмотреть характерные для угольных шахт типы очагов и описать соответствующую им пожарную нагрузку, включая свойства материалов, участвующих в процессе горения, и других параметров, имеющих существенное значение при задании модели в FDS.

Пожары в угольных шахтах могут быть классифицированы по источнику возгорания и типу горючего материала. Для целей численного моделирования были выделены наиболее распространенные и опасные сценарии, каждый из которых характеризуется специфическими условиями возникновения, динамикой развития и параметрами горения.

Среди экзогенных пожаров наиболее характерными для угольных шахт являются пожары ленточных конвейеров, электрических кабелей, древесных элементов крепи и электрооборудования.

Одними из самых распространенных и при этом опасных экзогенных сценариев являются **пожары на ленточных конвейерах**. Их высокая опасность обусловлена большим количеством горючего материала (значительная протяженность источника), включая транспортируемый уголь, повышенной токсичностью продуктов горения. С точки зрения динамики развития, пожар ленточного конвейера описывается как многостадийный процесс: сначала происходит локальный нагрев, пиролиз и дымление материала ленты, затем переход к открытому пламенному горению с быстрым ростом тепловыделения и продольное распространение пламени вдоль ленты с выходом на квазистационарную стадию. Местами

возникновения таких пожаров являются конвейерные штреки, уклоны и бремсберги. Особую опасность представляют длинные магистральные конвейеры [21, 88].

Причины возгорания конвейерных лент разнообразны. Одной из характерных причин является трение, возникающее из-за заклинивания ролика, пробуксовки приводного барабана или трения ленты о конструктивные элементы конвейера или борта выработки при ее сходе. Нагрев в результате трения может воспламенить угольную пыль, а затем и саму ленту. Другие причины включают внешние источники, такие как неисправное электрооборудование, расположенное вблизи конвейера, или распространение огня от другого источника, например, пожара пролива масла. Значительную роль также играет неудовлетворительное техническое обслуживание оборудования и отсутствие должного контроля за технологическим процессом [89].

Основным горючим материалом при данном сценарии является сам материал ленты, например, в резинотканевых лентах основой служит стирол-бутадиеновый каучук (SBR), также используется поливинилхлорид (ПВХ), хлоропреновый каучук (неопрен).

Согласно данным крупномасштабных испытаний при горении SBR-ленты шириной около 1,8 м пиковая мощность тепловыделения пожара находилась в диапазоне 6-9 МВт при этом скорость распространения пламени для этого случая составляла 4,5-6,4 м/мин [90]. В других полномасштабных исследованиях конвеерных лент установлено, что скорость распространения пламени достигает максимума при вентиляции порядка 1,5-2,0 м/с и может составлять до 7,41 см/с (около 4,45 м/мин), при этом пиковая мощность тепловыделения развитого пожара достигает 8,0 МВт примерно через 400 с после начала устойчивого распространения пламени [91].

Возгорание **электрических кабелей** также нередко становится причиной пожаров в шахтах, они возникают в кабельных выработках,

каналах, вертикальных стволах, вдоль конвейерных штреков, а также вблизи подстанций и распределительных пунктов.

Причинами таких пожаров являются короткие замыкания из-за повреждения изоляции, старения или механического воздействия, перегрузка кабеля выше допустимых пределов с последующим перегревом изоляции, внешний нагрев от другого пожара или оборудования.

Основными горючими компонентами в данном случае являются наружные оболочки и изоляция на основе поливинилхлорида и сшитого полиэтилена (XLPE). При испытаниях кабелей с XLPE-изоляцией в конусном калориметре было установлено, что пиковая удельная мощность тепловыделения при горении таких кабелей лежит в диапазоне 250-275 кВт/м², при этом рост внешнего теплового потока уменьшает время до воспламенения и достижения пика мощности тепловыделения [92]. При аналогичных испытаниях двух типов шахтных кабелей с внешним тепловым потоком 30-60 кВт/м² пиковая скорость образования оксида углерода составляла 0,0057-0,0075 г/с, а скорость дымообразования находилась в диапазоне 0,049-0,090 м²/с [93].

Динамика развития пожара зависит от конфигурации прокладки, взаимного расположения кабелей, а также условий вентиляции. Для одиночного кабеля характерно относительно медленное распространение пламени, а общее тепловыделение при этом низкое. Однако пучки кабелей значительно опаснее, так как взаимный подогрев кабелей может ускорять пиролиз и вовлечение соседних кабелей в горение [94].

Деревянная крепь хотя и менее распространена в современных шахтах, остается горючим материалом в старых выработках и временных сооружениях. Причинами возгорания могут быть короткие замыкания кабелей, проложенных по крепи, распространение огня от другого источника (например, оборудования), а также неосторожное обращение с огнем.

Для древесины характерно более медленное начальное развитие пожара по сравнению с полимерными материалами. Огонь распространяется

по поверхности крепи, особенно в местах сопряжений и при наличии сплошной затяжки. Одним из серьезных последствий является обрушение прогретой и перегоревшей крепи, что может блокировать выработку и изменять режим вентиляции.

Пиковые значения удельной мощности тепловыделения, согласно экспериментальным данным возрастают по мере роста внешнего теплового потока: при 35 кВт/м² они составляют примерно 143-178 кВт/м², при 50 кВт/м² уже 150-209 кВт/м², а при 80 кВт/м² уже лежат в диапазоне 197-303 кВт/м². Эффективная удельная теплота сгорания древесных образцов при этом находится примерно в диапазоне 10-13 МДж/кг. Следовательно, для описания пожара деревянной крепи можно считать характерными сравнительно медленный выход на горение, пиковую удельную мощность тепловыделения 150-300 кВт/м² и длительную стадию поверхностного горения с постепенным обугливанием. Общее тепловыделение может достигать нескольких МВт при горении больших массивов крепи [95].

Пожары электрооборудования, особенно маслонаполненных трансформаторов, представляют значительную опасность из-за высокой концентрации энергии и потенциального выброса горящего масла. Местами возникновения таких пожаров являются подземные подстанции (ТПП, РПП), насосные камеры и приводные станции.

Причинами возгорания могут быть внутренние короткие замыкания в обмотках трансформатора (особенно маслонаполненного), пробой изоляции, перегрев контактов в высоковольтных ячейках, перегрев и возгорание сухих трансформаторов или реакторов, а также воздействие внешнего пожара.

Горючими материалами являются:

- Трансформаторное масло: минеральное масло является горючим, его характеристики воспламенения, тепловыделения и образования продуктов горения зависят от вида масла и условий теплового воздействия [96].
- Изоляционные материалы: бумага, картон (пропитанные маслом),

пластики и компаунды в сухих трансформаторах и ячейках.

Динамика пожара для маслонаполненных трансформаторов может включать разрушение бака при внутреннем коротком замыкании с разбросом горящего масла, что приводит к образованию пожара пролива. Горение масла является интенсивным, с большим количеством дыма. Общее тепловыделение может достигать сотен киловатт или мегаватт в зависимости от количества масла [97]. Горение сухих трансформаторов и ячеек менее интенсивное, но может привести к распространению огня на кабели и другое оборудование. При моделировании учитывается возможность разбрызгивания масла путем задания большой начальной площади пролива.

Пожары самоходного оборудования, в том числе подземных самосвалов, погрузочно-доставочных машин, буровых установок и вспомогательного транспорта возникают как правило в результате электрических неисправностей и попадания топлива или гидравлической жидкости на нагретые поверхности. Основную пожарную нагрузку при таких пожарах образуют дизельное топливо, масла, гидравлические рукава, кабели, шины и элементы кабины [98].

Мощность тепловыделения таких пожаров может составлять от единиц до десятков мегаватт. Например, в полномасштабных исследованиях проливов топлива диаметром 1,47 и 1,67 м средняя мощность тепловыделения, определяемая по потере массы топлива, составляла 3,9 и 5,3 МВт соответственно [99]. В другом полномасштабном исследовании для пролива топлива площадью около 4,5 м² номинальная мощность составляла около 10 МВт [100]. По результатам натурных испытаний рудничной техники максимальная мощность тепловыделения при горении одной шины оценена в 1,4 МВт для буровой установки и 4,1 МВт для погрузчика [101]. При этом в расчетном сценарии пожара подземного погрузчика Toro 0011 при последовательном вовлечении четырех шин, рукавов, а также пролива гидравлического масла суммарная мощность тепловыделения пожара достигала 8 МВт [102]. Таким образом, пожары отдельных компонентов

техники, проливов топлива представляют собой локализованные очаги мощностью примерно до 10 МВт.

В случае распространения горения на несколько компонентов тяжелой техники мощность тепловыделения пожара может быть еще выше. Полномасштабные эксперименты с горением подземного погрузчика показали, что пиковая мощность тепловыделения пожара при таком сценарии может достигать 15,9 МВт через 11 минут от момента зажигания [103]. При этом, особенности конструкции и расстояния между компонентами могут задерживать или ограничивать распространение пламени, поэтому, мощность тепловыделения пожара зависит не только от общего количества горючих материалов, но и от степени их одновременного вовлечения в процесс горения [98, 101].

Эндогенные пожары происходят из-за процесса низкотемпературного окисления угля кислородом воздуха. Если выделяющееся при этом тепло не рассеивается в окружающую среду, температура угля повышается, ускоряя реакцию окисления, что в конечном итоге может привести к самовозгоранию.

Основные причины и факторы, способствующие возникновению эндогенных пожаров, включают [3, 9]:

- Склонность угля к самовозгоранию: определяется маркой угля, его петрографическим составом, пористостью, влажностью, содержанием летучих веществ и серы. Молодые угли и угли с высоким содержанием летучих веществ более склонны к самовозгоранию.
- Накопление угля: скопления разрыхленного угля, угольной пыли, особенно в отработанных пространствах, целиках и в местах обрушения пород, создают благоприятные условия для аккумуляции тепла.
- Доступ кислорода: необходим для процесса окисления. Утечки воздуха через выработанное пространство, целики, вентиляционные сооружения являются основными путями поступления кислорода к очагам самонагревания.

- Теплоизоляция: накопленный уголь и окружающие породы могут препятствовать рассеиванию тепла, способствуя его аккумуляции.
- Геологические и горнотехнические условия: нарушенность массива пород, наличие тектонических разломов, глубина разработки, система разработки, порядок отработки пластов, скорость подвигания очистного забоя и управление кровлей – все это влияет на воздухопроницаемость массива и условия теплообмена.

Наиболее характерными местами возникновения эндогенных пожаров являются [104, 105]:

- Выработанные пространства: наиболее частые места возникновения эндогенных пожаров, где обрушенные породы и оставленный уголь создают большую поверхность для окисления и условия для накопления тепла. Утечки воздуха через выработанное пространство обеспечивают приток кислорода.
- Целики угля: оставляемые для поддержания кровли или разделения выемочных полей целики могут подвергаться самовозгоранию, особенно если они раздроблены или через них фильтруется воздух.
- Старые, временно или постоянно погашенные выработки: в них могут оставаться скопления угля, и при нарушении изоляции и поступлении свежего воздуха возможно самовозгорание.
- Тупиковые забои и подготовительные выработки: хотя и реже, но при длительном простое и наличии благоприятных условий (например, оставленный разрыхленный уголь, приток воздуха) возможно возникновение очагов самонагревания.
- Места обрушения пород: обрушения могут приводить к образованию скоплений угля и созданию путей для утечек воздуха.

Процесс самовозгорания угля начинается с момента контакта угольной поверхности с воздухом. Уголь адсорбирует кислород, и на поверхности ископаемого образуются склонные к расщеплению кислородные комплексы, выделяющие небольшое количество теплоты. По мере роста температуры

неустойчивые соединения распадаются, приводя к образованию углекислого газа, воды и монооксида углерода. Самонагревание развивается в условиях, когда выделение теплоты при окислении угля превышает её отвод в окружающую среду [106, 107].

Самовозгорание угля определяется как воспламенение угля в результате непрерывно развивающихся окислительных реакций в самом веществе. В результате окисления угля вначале происходит повышение температуры (самонагревание), и если температура достигает критического значения, то самонагревание переходит в самовозгорание угля. Переход от стадии самонагревания к горению происходит скачкообразно по достижении некоторой критической температуры и характеризуется качественным изменением механизма окисления, что приводит к резкому ускорению скорости тепловыделения и делает процесс практически неуправляемым [108].

Параметры эндогенных пожаров существенно отличаются от экзогенных. Удельное тепловыделение (УТВ) для тлеющего угля значительно ниже, чем для открытого пламени. В начальных стадиях эндогенного пожара, когда преобладает тление, УТВ может быть в диапазоне 10-100 кВт/м². При переходе к открытому пламенному горению УТВ может достигать 250-500 кВт/м² и выше, в зависимости от свойств угля и условий вентиляции. Некоторые исследования указывают на пиковые значения тепловыделения для угля до 1 МВт/м² в условиях хорошей вентиляции. С течением времени УТВ растет медленно на начальной стадии, затем происходит резкий рост при переходе к активному горению, после чего может стабилизироваться или снижаться.

Скорость и характер распространения пламени/зоны горения также зависят от режима: тлеющее горение распространяется медленно (несколько сантиметров-десятков сантиметров в сутки), пламенное горение – значительно быстрее (несколько метров в час и более). Распространение пламени в шахтных выработках сильно зависит от скорости и направления

вентиляционного потока, может наблюдаться явление "отката дыма" [109].

Одним из важнейших параметров при численном моделировании пожара является динамика изменения мощности тепловыделения пожара (Heat Release Rate, HRR), то есть зависимость тепловой мощности пожара от времени $\dot{Q}(t)$. Этот параметр в значительной степени определяет темпы роста температур и концентраций продуктов горения [30, 73].

Наиболее широко используемой аппроксимацией начальной стадии роста является квадратичный закон роста пожара, при котором тепловая мощность источника $\dot{Q}(t)$, кВт, описывается выражением [110]:

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^2 \tag{3.3}$$

где α – коэффициент роста пожара, кВт/с^2.

После фазы роста пожар некоторое время может сохранять мощность, близкую к постоянной (стадия полностью развитого горения), в таком случае, зависимость мощности тепловыделения пожара обычно описывается следующим кусочно-заданным выражением [111, 112]:

$$Q(t) = \begin{cases} \alpha t^2, \ 0 \leq t \leq t_{\text{peak}} \\ Q_{\text{peak}}, \ t > t_{\text{peak}} \end{cases} \tag{3.4}$$

где Q_{peak} - пиковая тепловая мощность пожара, кВт, t_{peak} - время её достижения.

Тогда коэффициент роста пожара α можно выразить в следующем виде:

$$\alpha = \frac{Q_{\text{peak}}}{t_{\text{peak}}^2} \tag{3.5}$$

Коэффициент α таким образом определяется однозначно при фиксированных Q_{peak} и t_{peak}, что делает такую форму представления подходящей для формирования пространства сценариев в CFD-моделировании, т.к. достаточно варьировать пиковую мощность тепловыделения и время её достижения для получения семейства кривых с прозрачной физической интерпретацией.

Однако, при выборе конкретных значений времени достижения

пиковой тепловой мощности пожара t_{peak}, следует учитывать, что реальные шахтные пожары различаются по природе пожарной нагрузки и, соответственно, по кинетике тепловыделения. Для обоснованного задания параметра t_{peak}, необходимо опираться на результаты огневых испытаний горючих материалов и объектов, используемых при подземных горных работах.

Анализ данных экспериментов показывает, что для локализованных очагов с пожарной нагрузкой из полимерных материалов, характерных для шахтных электроустановок и оборудования, типичные времена роста скорости тепловыделения до пиковых значений составляют порядка нескольких минут. Например, при испытаниях шахтного низковольтного кабеля с использованием конусного калориметра, получены времена от момента воспламенения до пика 206, 132 и 116 с при внешнем тепловом потоке 25, 35 и 50 кВт/м² соответственно, а для гидравлического рукава - 258, 235 и 176 с [113]. Согласно данным результатам, диапазон значений параметра t_{peak} от 120 до 240 с можно принять как физически реалистичный для сценариев шахтных пожаров с быстрым и умеренным развитием.

Для распределенных пожаров, прежде всего пожаров конвеерных лент, этого диапазона недостаточно. Согласно исследованиям [91, 114, 115] сценарии пожаров на конвеерах также характеризуются быстрой начальной фазой разгона с переходом в квазистационарную фазу, однако характерный временной масштаб фазы развития нередко лежит уже не в диапазоне 2-4 минут, а ближе к 5-10 минутам.

Исходя из приведенных данных экспериментов, в базовое пространство сценариев целесообразно включить следующие значения времени достижения пиковой мощности тепловыделения t_{peak} = 120, 180, 240, 300 с, которые соответствуют быстрому, умеренно-быстрому, умеренному и замедленному вариантам развития пожара и разным типам пожарной нагрузки, характерной для подземных горных работ. Также следует включить расширенный уровень, включающий значения t_{peak} = 420, 600 с. Такой выбор

позволяет покрыть значительную часть вариации динамики роста скорости тепловыделения при пожарах в шахтах и в то же время остается приемлемым по вычислительным затратам.

Выводы по главе

1. При пожаре в горной выработке в случае нисходящего проветривания (отрицательные углы наклона) происходит выраженное замедление фронта опасных факторов вследствие встречного действия сил термогравитационной плавучести. При этом максимальное увеличение среднего времени прибытия фронта оксида углерода (CO) наблюдается при угле наклона -20° и достигает 11,4% в исследованных условиях. В то же время положительные углы наклона оказывают лишь умеренное ускоряющее воздействие (в пределах 3-4%), что говорит об асимметричном характере взаимодействия вынужденной и естественной конвекции в наклонных выработках.

2. Также зафиксировано несовпадение условий экстремумов стратификации для теплового и концентрационного полей. Максимум средней температурной стратификации достигается при малом положительном угле наклона θ = +5°, тогда как для оксида углерода этот максимум находится в области отрицательных значений θ = -5°. При θ = -20° зафиксировано практически полное исчезновение температурной разницы между верхней и нижней зонами выработки, при этом вертикальная неоднородность по оксиду углерода сохраняется, хотя и значительно снижается относительно горизонтального случая.

3. Температура и концентрация CO имеют различный характер продольного распределения вдоль выработки. Среднее превышение температуры над фоном монотонно уменьшается при удалении от очага пожара, сохраняя выраженный продольный градиент даже на расстояниях порядка 200 м. В отличие от температуры, концентрация CO в ближней зоне быстро снижается, а затем выходит на близкий к постоянному уровень

вследствие влияния турбулентной диффузии и выравнивания концентрации по сечению. Таким образом, температурные данные содержат информацию об удалённости от очага, тогда как концентрация CO отражает перенос продуктов горения и может использоваться как дополнительный информативный признак при оценке развития пожара, в том числе на удалённых участках выработки.

4. Показано, что скорость вентиляционного потока существенно влияет на форму продольного температурного профиля. При скоростях 1,0–2,0 м/с среднее превышение температуры на нисходящем участке профиля удовлетворительно описывается простой экспоненциальной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 > 0{,}95$. При увеличении скорости до 2,5–5,0 м/с температурный профиль изменяется качественно: в ближней области наблюдается более резкое начальное снижение температуры после максимума, сменяющееся более пологим затуханием в дальней области, при этом для части режимов максимум средней температуры смещается по направлению потока. Это указывает на целесообразность учёта скорости вентиляции при интерпретации температурных измерений и при формировании входных признаков модели оценки параметров пожара.

5. Проведённый анализ характерных сценариев пожаров в шахтах позволил выделить основные виды пожарной нагрузки и определить значения параметров, необходимые для постановки численных экспериментов. Для формирования расчётного пространства принята параметризация развития пожара через пиковую мощность тепловыделения и время её достижения. Такой подход позволяет задавать семейство физически интерпретируемых кривых тепловыделения, охватывающих различные по интенсивности и темпу развития сценарии пожара, сохраняя при этом сопоставимость результатов расчётов. Это обеспечивает контролируемое варьирование ключевых факторов и формирует основу для последующего обучения модели, связывающей показания в точках измерения, параметры

вентиляционного режима и геометрии выработки с текущей мощностью тепловыделения, положением очага и прогнозом опасных факторов пожара.

4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА

4.1. Постановка задачи машинного обучения и архитектура нейросетевой модели

Пространство сценариев для CFD-моделирования задавалось вариацией следующих параметров: угол наклона выработки, пиковая мощность тепловыделения пожара, продольная скорость движения вентиляционного потока, время достижения пиковой мощности и размеры поперечного сечения выработки. Для учёта влияния размеров выработки использовались три варианта, соответствующие выработкам малого, среднего и крупного поперечного сечения. Остальные параметры изменялись в пределах заданных диапазонов. Полное пространство рассматриваемых параметров приведено в табл. 4.1

Таблица 4.1 - Диапазоны варьирования параметров вычислительных сценариев

Параметр	**Обозначение**	**Значения и диапазоны параметров**
Пиковая мощность тепловыделения пожара	Q_{peak}	от 1 до 10 МВт
Скорость вентиляционного потока	V	от 1 до 5 м/с
Время достижения максимальной мощности тепловыделения	t_{peak}	от 120 до 600 с
Угол наклона выработки	θ	от −12 до +12°
Высота выработки	H	2,4; 3,6; 4,8 м
Площадь поперечного сечения выработки	S	8,64; 17,28; 23,04 м²

Для каждого сценария выполнялся отдельный CFD-расчёт с уникальным идентификатором, по которому в дальнейшем проводилось разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую части. Таким образом, качество модели оценивалось на сценариях, не использовавшихся при обучении, что обеспечивало проверку способности искусственной

нейронной сети обобщать результаты на новые сочетания мощности тепловыделения пожара, скорости вентиляционного потока, времени развития пожара и геометрических параметров выработки.

CFD-модель предусматривала запись значений температуры и концентрации оксида углерода (CO) в контрольных точках, находящихся у кровли выработки. Для обучения искусственной нейронной сети формировались конфигурации, состоящие из двух точек, обозначаемых как p_1, p_2, и расположенных последовательно по направлению вентиляционного потока. Точки измерения располагались так, чтобы расстояние между ними было фиксированным, при этом расстояния от очага от очага пожара до точек измерительной конфигурации варьировались, что обеспечивало рассмотрение различных положений конфигурации относительно источника пожара.

В каждой точке p_i, $i = 1{,}2$ в момент времени t регистрировались две величины: температура газовой среды $T_i(t)$, °C и концентрация оксида углерода $C_i(t)$. По этим данным для каждой точки измерения создавалось временное окно предшествующих значений измеряемой величины, поскольку такая форма входных данных позволяет учитывать не только текущие значения температуры и концентрации CO, но и характер их изменения во времени. В рассматриваемом случае для температуры и концентрации CO учитывалась история показаний за последние 30 с.

Дополнительно в качестве известного параметра режима проветривания во входной вектор признаков включалась скорость продольного вентиляционного потока V, м/с, а также угол наклона выработки θ, град, площадь поперечного сечения S, м², и высота H, м, выработки. Таким образом, общий входной вектор признаков нейросети имел следующий вид:

$$\boldsymbol{x}(t) = \left[w_{\mathrm{T,C}}^{(1)}(t), w_{\mathrm{T,C}}^{(2)}(t), \dots, w_{\mathrm{T,C}}^{(n)}(t), V, \theta, S, H\right] \tag{4.1}$$

где $\boldsymbol{w}_{\mathrm{T,C}}^{(i)}(t)$ - временное окно предшествующих значений температуры

и концентрации CO в i-й точке измерения.

Вектор целей искусственной нейронной сети включал две группы величин. Первая группа соответствовала решению обратной задачи и характеризовала текущие скрытые параметры пожара: расстояние от очага пожара до наиболее удаленной точки измерения и текущую мощность тепловыделения (рис. 4.1). Вторая группа включала прогнозные значения температуры и концентрации CO в заданных контрольных точках на горизонте прогнозирования Δ. При этом множество точек прогнозирования могло включать как точки фактического измерения, так и дополнительные контрольные точки, не входящие во входную измерительную конфигурацию. Таким образом, целевой вектор имел вид:

$$\boldsymbol{y}(t) = \left[d, \dot{Q}(t), T_1(t+\Delta), C_1(t+\Delta), \ldots, T_m(t+\Delta), C_m(t+\Delta)\right] \in \mathbb{R}^{2m+2} \quad (4.2)$$

где d - расстояние до очага пожара, м; $\dot{Q}(t)$ - текущее значение мощности тепловыделения пожара, кВт; $T_i(t+\Delta)$ - прогнозируемая температура в i-й контрольной точке, °C; $C_i(t+\Delta)$ – прогнозируемая концентрация CO в i-й контрольной точке, ppm; m - число контрольных точек, для которых выполнялся прогноз температуры и концентрации CO, Δ - горизонт прогнозирования, с.

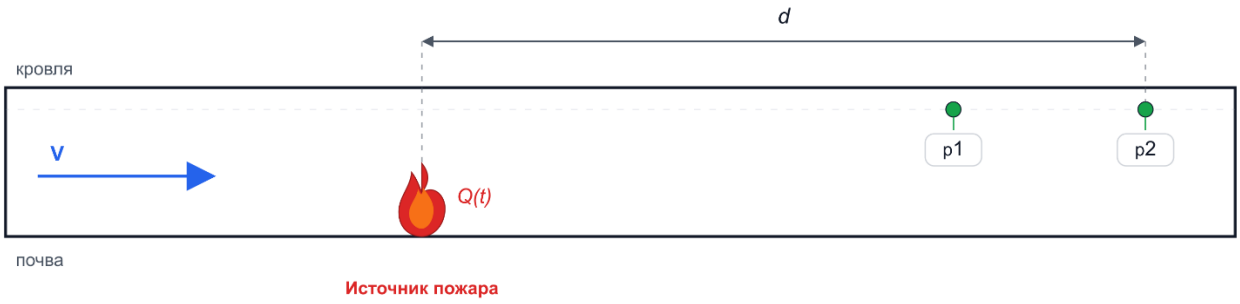

Рис. 4.1. – Схема постановки обратной задачи оценки мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара в горной выработке

После формирования обучающего набора данных выполнялось его разделение на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Разделение

проводилось по уникальным идентификаторам CFD-сценариев CHID, а не по отдельным строкам датасета, в результате чего все временные отсчёты, относящиеся к одному CFD-расчёту, попадали только в одну из выборок. Такой способ разбиения предотвращал утечку информации между выборками и обеспечивал оценку качества модели на сценариях, не использовавшихся при обучении.

Для решения задачи использовалась многослойная полносвязная искусственная нейронная сеть, реализующая отображение

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = f_{\boldsymbol{\theta}}\big(\mathbf{x}(t)\big) \tag{4.3}$$

где $\mathbf{x}(t)$ - входной вектор признаков, $\hat{\mathbf{y}}(t)$ - вектор предсказанных значений целевых переменных, $\boldsymbol{\theta}$ - набор обучаемых параметров модели.

В скрытых слоях нейронной сети использовалась функция активации ReLU [116, 117].

Перед обучением входные признаки и целевые переменные стандартизировались следующим образом: для каждой переменной z рассчитывалось среднее значение μ_z и стандартное отклонение s_z по обучающей выборке, далее выполнялось преобразование

$$z^* = \frac{z - \mu_z}{s_z} \tag{4.4}$$

где z^* - стандартизованное значение соответствующей переменной.

Параметры, рассчитанные на обучающей выборке, использовались для преобразования валидационной и тестовой выборок, а также для обратного преобразования целевых переменных к исходным физическим единицам. Такой порядок обработки данных исключает использование информации из тестовой выборки при подготовке данных для обучения [118].

При обучении нейронной сети минимизировалась средняя абсолютная ошибка между стандартизированными истинными значениями целевых

переменных и соответствующими предсказаниями модели. Для пакета данных размера B частная функция потерь отдельной выходной ветви $\mathcal{L}(\theta)$ описывалась следующим выражением

$$\mathcal{L}(\theta) = \frac{1}{Bm}\sum_{j=1}^{B}\sum_{k=1}^{m}\left|\widehat{y_{j,k}^{*}} - y_{j,k}^{*}\right| \quad (4.5)$$

где B - число примеров в пакете данных, m - количество целевых переменных соответствующей выходной ветви, $y_{j,k}^{*}$ - стандартизованное истинное значение k-ой целевой переменной для j-ого объекта, $\widehat{y_{j,k}^{*}}$ - соответствующее предсказанное значение.

Минимизация функции потерь выполнялась с использованием метода градиентной оптимизации AdamW. Выходная часть нейронной сети разделялась на три ветви: для оценки расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения пожара и совместного прогноза температуры и концентрации CO. Общая функция потерь определялась суммой частных функций потерь этих ветвей. Нейросетевая модель была реализована на языке Python с использованием открытой библиотеки машинного обучения PyTorch [119]. Характеристики модели и принятые настройки обучения представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Основные параметры нейросетевой модели и процесса обучения

Параметр	**Характеристика / значение**
Функция активации	ReLU
Метод оптимизации	AdamW
Скорость обучения (learning rate)	10^{-4}
Размер пакета данных (batch size)	4096
Максимальное число эпох	320
Число обучаемых параметров	порядка 10^{6}
Вычислительная платформа	графический процессор (GPU), CUDA

4.2. Оценка точности нейросетевой модели при оперативном определении мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара

Для оценки качества нейросетевой модели использовались метрики, рассчитываемые после обратного преобразования предсказанных значений к исходным физическим единицам. Для отдельной целевой переменной использовалась средняя абсолютная ошибка (MAE), выражаемая в единицах измерения целевой переменной и определяемая как

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left|y_j - \widehat{y_j}\right| \tag{4.6}$$

где y_j - истинное значение j-й целевой переменной, $\widehat{y_j}$ – предсказанное значение соответствующей переменной, N - число объектов тестовой выборки.

Для оценки доли объяснённой дисперсии использовался коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N}\left(y_j - \widehat{y_j}\right)^2}{\sum_{j=1}^{N}\left(y_j - \bar{y}\right)^2} \tag{4.7}$$

где $\bar{y}$ - среднее значение соответствующей целевой переменной на тестовой выборке.

Для сопоставления ошибок величин, имеющих разные единицы измерения, дополнительно использовалась нормированная средняя абсолютная ошибка, NMAE (%)

$$NMAE = \frac{MAE}{D_y} \cdot 100\% \tag{4.8}$$

где D_y - нормирующее значение для соответствующей целевой

величины.

Для расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения, температуры и концентрации CO значение D_y определялось как диапазон истинных значений соответствующей целевой переменной на тестовой выборке. При расчёте данной метрики для группы однотипных целевых переменных, например для температур в нескольких контрольных точках, данный диапазон определялся по объединённому массиву истинных значений соответствующей группы.

Дополнительно для оценки верхней части распределения ошибок рассчитывался 90-й процентиль абсолютной ошибки, далее обозначаемый как p_{90}. Данный показатель соответствует значению абсолютной ошибки $\left|y_j - \hat{y}_j\right|$, ниже которого находится 90 % всех рассчитанных абсолютных ошибок для соответствующей группы целевых величин. Относительное значение p_{90} определялось делением соответствующих процентилей абсолютной ошибки на нормирующее значение D_y. Все метрики рассчитывались отдельно для каждой из трёх случайных инициализаций модели, после чего полученные значения усреднялись. Время однократного расчёта значений целевых переменных по сформированному входному вектору с использованием обученной нейросети на центральном процессоре составляло менее одной секунды.

Как видно из табл. 4.3, средняя абсолютная ошибка оценки текущей мощности тепловыделения пожара составила 140,98 кВт, а нормализованная средняя абсолютная ошибка (NMAE) - 1,35 %. При этом для 90 % предсказаний модели абсолютная ошибка не превышала 402,28 кВт, что соответственно составляет 3,87 % от нормирующего диапазона. Таким образом, модель способна восстанавливать текущую интенсивность пожара по косвенным признакам, содержащимся во временных окнах температуры и концентрации CO при известной скорости вентиляционного потока.

Таблица 4.3 – Метрики качества искусственной нейронной сети на тестовой выборке при оценке текущей мощности тепловыделения пожара и расстояния до очага

Целевая переменная	**MAE - средняя абсолютная ошибка**	**NMAE – нормализованная средняя абсолютная ошибка, %**	**R^2**	**p_{90} - 90-й процентиль абсолютной ошибки**	**Относительные значения p_{90} , % от диапазона**
Текущая мощность тепловыделения пожара $\dot{Q}(t)$, кВт	140,98	1,35	0,981	402,28	3,87
Расстояние до очага d , м	4,36	3,35	0,957	8,76	6,74

Аналогичный вывод можно сделать относительно способности нейросетевой модели к оценке расстояния до очага d. Средняя абсолютная ошибка для этой целевой переменной составила 4,36 м, что соответствует NMAE = 3,35 %, а 90-й процентиль абсолютной ошибки составил 8,76 м или 6,74 % от нормирующего диапазона. С учётом протяжённости рассматриваемой области и принятой измерительной конфигурации этот результат показывает, что в рамках данной постановки модель может использоваться для предварительного определения участка выработки, в котором расположен очаг пожара.

Для обеих целевых величин коэффициент детерминации R^2 составил не менее 0,95. Это свидетельствует о высокой доле объяснённой дисперсии и показывает, что нейросетевая модель не только обеспечивает приемлемые значения средних ошибок, но и воспроизводит основную вариацию целевых параметров на тестовой выборке.

Среднее смещение при оценке текущей мощности тепловыделения составило +10,45 кВт. По сравнению с диапазоном изменения мощности тепловыделения в тестовой выборке данная величина невелика, что указывает на отсутствие выраженного систематического завышения

оцениваемой величины. Стандартное отклонение знаковой ошибки составило 267,16 кВт и существенно превышает среднее смещение. Следовательно, основная часть ошибки связана не с устойчивым смещением предсказаний в одну сторону, а с разбросом ошибок по отдельным сценариям и моментам времени.

Для расстояния до очага среднее смещение составило +0,36 м. Это означает, что модель в среднем незначительно завышает расстояние до очага, однако величина данного смещения мала относительно нормирующего значения и средней абсолютной ошибки. Следовательно, как и в случае мощности тепловыделения, точность оценки расстояния определяется преимущественно разбросом ошибок в отдельных режимах, а не устойчивой систематической переоценкой или недооценкой целевой величины.

Полученные результаты показывают, что временные окна температуры и концентрации CO содержат информацию, достаточную для оценки текущих параметров источника пожара. В рамках рассматриваемой постановки модель способна оценивать интенсивность пожара и расстояние до очага с ошибками, составляющими единицы процентов от соответствующих нормирующих диапазонов. Это подтверждает возможность использования нейросетевой модели как элемента оперативного прогноза аварийной обстановки по принятым в рассматриваемой постановке входным данным.

4.3. Обоснование возможности прогнозирования опасных факторов пожара в горной выработке с использованием нейросетевой модели

Для оценки качества нейросетевой модели при решении задачи краткосрочного прогнозирования опасных факторов пожара (температуры и концентрации CO) в заданных точках пространства выработки использовались те же показатели, что и для мощности тепловыделения, расстояния до очага. При этом для температуры и концентрации CO показатели были рассчитаны по объединённому массиву ошибок, что позволяет оценить среднюю точность прогноза опасных факторов пожара по

всем рассматриваемым точкам.

Прогноз выполнялся на горизонте 60 с по временным окнам измерений температуры и концентрации CO в двух точках, где осуществлялись измерения. Помимо прогноза в самих точках измерения, дополнительно рассматривались заранее заданные дополнительные контрольные точки, расположенные на высоте 1,7 м и не входящие в измерительную конфигурацию, т.е. значения температуры и CO в которых не использовались в качестве входных данных, но прогнозировались моделью как целевые величины. Такой подход позволяет проверить, может ли модель по ограниченному набору измерений не только прогнозировать значения в местах размещения датчиков, но и восстанавливать ожидаемое изменение опасных факторов пожара в других точках рассматриваемого участка выработки.



Рис. 4.2. – Общая схема задачи прогнозирования температуры и концентрации CO в условно заданных контрольных точках горной выработки

Дополнительные контрольные точки располагались вдоль оси выработки с шагом 10 м в пределах рассматриваемой области: от начала участка до наиболее удалённой точки измерительной конфигурации, расположенной в конце выработки. При этом ошибки прогноза в точках измерения и в дополнительных контрольных точках анализировались раздельно. Такое разделение необходимо, поскольку первая группа характеризует точность прогноза в местах фактического контроля, а вторая - способность модели переносить прогноз на точки, в которых измерения отсутствуют.

Из данных таблицы 4.4 видно, что модель успешно прогнозирует оба показателя в точках фактического измерения и в заданных контрольных точках. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры на горизонте прогноза 60 с составила 2,79 °C в точках измерения и 4,31 °C в заданных точках. Для концентрации CO соответствующие значения составили 2,51 и 2,91 ppm. Полученные значения указывают на возможность использования модели для краткосрочного прогноза температурно-газовой обстановки не только в точках размещения датчиков, но и в других заранее заданных точках выработки.

Таблица 4.4 – Метрики качества нейросетевой модели при прогнозировании температуры и концентрации CO на горизонте 60 с

Прогнозируемый показатель	**MAE - средняя абсолютная ошибка**	**NMAE - нормализованная средняя абсолютная ошибка, %**	**R^2**	**p_{90} - 90-й процентиль абсолютной ошибки**	**Относительные значения p_{90}, % от диапазона**
Температура в точках измерения, °C	2,79	0,71	0,972	6,63	1,68
Концентрация оксида углерода в точках измерения, ppm	2,51	0,98	0,977	5,83	2,27
Температура в заданных контрольных точках, °C	4,31	0,86	0,865	8,78	1,75
Концентрация оксида углерода в заданных контрольных точках, ppm	2,91	0,83	0,897	6,21	1,76

Значения коэффициента детерминации R^2 составили 0,972 для температуры и 0,977 для CO в точках измерения, а также 0,865 и 0,897 соответственно в заданных контрольных точках. Это показывает, что модель

воспроизводит основную вариацию прогнозируемых параметров на тестовой выборке. При этом 90-й процентиль абсолютной ошибки для температуры составил 6,63 °C в точках измерения и 8,78 °C в заданных точках, что соответствует 1,68 и 1,75 % от диапазона изменения температуры. Для концентрации CO 90-й процентиль абсолютной ошибки составил 5,83 и 6,21 ppm соответственно, или 2,27 и 1,76 % от диапазона изменения концентрации CO.

Для более детальной оценки качества прогноза в дополнительных контрольных точках был выполнен анализ ошибок по разным зонам рассматриваемой области (табл. 4.5). Дополнительные точки были сгруппированы по положению вдоль оси выработки: приочаговая зона включала точки от - 40 до 40 м, средняя зона - от 40 до 120 м, удалённая зона - от 120 до 200 м. При этом точки на границах 40 и 120 м относились к следующей зоне. Такое разделение позволяет оценить, как меняется точность прогноза по мере удаления от области наиболее интенсивного изменения прогнозируемых величин.

Таблица 4.5 – Точность прогноза температуры и концентрации CO в дополнительных контрольных точках по зонам выработки.

Зона дополнительных контрольных точек	**Прогнозируемый показатель**	**MAE - средняя абсолютная ошибка**	**NMAE - нормализованная средняя абсолютная ошибка, %**
Приочаговая зона $-40 \le x < 40$ м	Температура, °C	9,50	1,90
	Концентрация CO, ppm	5,79	1,64
Средняя зона $40 \le x < 120$ м	Температура, °C	3,20	0,64
	Концентрация CO, ppm	2,57	0,73
Удалённая зона $120 \le x \le 200$ м	Температура, °C	1,56	0,31
	Концентрация CO, ppm	1,75	0,50

Результаты, приведенные в табл. 4.5 показывают, что наибольшая средняя ошибка прогноза температуры наблюдается в приочаговой зоне, для которой средняя абсолютная ошибка температуры составила 9,50 °C, тогда как в средней и удалённой зонах она снизилась до 3,20 и 1,56 °C

соответственно. Аналогичная тенденция в целом прослеживается и для концентрации оксида углерода: в начальной приочаговой зоне MAE составила 5,79 ppm, в средней зоне - 2,57 ppm, а в удаленной зоне снизилась до 1,75 ppm.

Такой характер распределения ошибок является ожидаемым, поскольку вблизи очага температурно-газовая обстановка изменяется наиболее интенсивно. В этой области сильнее проявляются нестационарность нагрева, пространственные градиенты температуры и локальное перемешивание потока, которые в том числе влияют на перенос тепла и продуктов горения вентиляционной струей. В результате образующееся расхождение по фазе развития сигнала или по времени прихода температурного возмущения к точке измерения может приводить к увеличению абсолютной ошибки прогноза.

При этом повышенные абсолютные ошибки в зоне у очага пожара следует рассматривать с учётом большей амплитуды изменения значений прогнозируемых величин в данной области. Для участка $-40 \leq x < 40$ м температура и концентрация CO наиболее изменчивы. Нормированная ошибка для этого участка остаётся небольшой и составляет 1,90 % для температуры и 1,64 % для концентрации CO от соответствующих общих диапазонов изменения прогнозируемых величин.

Данный результат может быть объяснён общей постановкой задачи и использованием временного окна предшествующих значений температуры и концентрации CO. В отличие от подхода, основанного только на текущем срезе измерений, временное окно содержит информацию о предшествующей динамике контролируемых параметров, в том числе о направлении изменения, скорости этого изменения, а также о форме сигнала, характерной для определённой стадии развития пожара при заданном режиме проветривания. Такая информация особенно важна для краткосрочного прогноза, поскольку она более полно отражает развитие процессов переноса тепла и продуктов горения вентиляционным потоком. В результате модель

получает информацию, достаточную для аппроксимации зависимости между текущей динамикой показаний датчиков и их значениями на горизонте 60 с в пределах рассмотренной постановки [120].

Прогноз значений температуры и концентрации CO на ближайший интервал времени позволяет оценить направление развития температурно-газовой обстановки в заданных точках выработки и может использоваться как дополнительная информация при анализе аварийной ситуации, организации эвакуации и планировании действий горноспасательных подразделений.

4.4. Исследование достаточности измерительных конфигураций для оценки и прогнозирования параметров пожара

Практический и научный интерес представляет собой задача определения рационально достаточной конфигурации точек и каналов измерения, обеспечивающей приемлемую точность решения задач оценки текущих параметров пожара и их прогнозирования. Под достаточностью конфигурации понимается способность системы датчиков обеспечивать низкий уровень ошибки модели по основным целевым переменным при сохранении конструктивной простоты и эксплуатационной состоятельности. Отдельное значение имеет нахождение минимально достаточной конфигурации, при которой дальнейшее увеличение числа точек и каналов измерений приводит лишь к умеренному повышению качества [121].

В ходе исследования проводилось сравнение следующих симметричных конфигураций: 1(T), 1(CO), 1(T+CO), 2(T), 2(CO), 2(T+CO), 3(T+CO), где число обозначает количество пространственно-разнесенных точек измерения, а в скобках указывается набор измерительных каналов в каждой точке.

Для каждой конфигурации оценивались ошибки решения обратной и прогностической задач по основным целевым переменным: расстояния до источника пожара D, текущей мощности тепловыделения Q(t), прогнозируемой в трех точках измерения температуры $T(t+\Delta)$ и

концентрации CO(t+Δ).

В качестве основной сравнительной метрики использлвалась нормированная средняя абсолютная ошибка (NMAE), поскольку данная метрика позволяет сопоставить точность различных целевых переменных, выраженных в разных физических единицах измерения. Для величины D нормировка выполнялась по диапазону расстояний до очага с целью обеспечения сопоставимости ошибки локализации с ошибками по остальным целевым величинам.

Согласно полученным результатам, простейшая конфигурация, состоящая из одной точки измерения температуры 1(T), недостаточна для рассматриваемой задачи. Нормированные средние ошибки модели (NMAE) при использовании данной конфигурации составили 23,18% по D и 6,47% по Q(t), что в физических единицах соответствует средней ошибке 30,13 м при оценке расстояния до очага и 673,84 кВт при оценке текущей мощности тепловыделения, то есть она не обеспечивает достаточную наблюдаемость ни для оценки расстояния до очага, ни для оценки интенсивности пожара.

Конфигурация 1(CO), включающая только один канал измерения концентрации оксида углерода, демонстрирует иную структуру ошибок. По сравнению с 1(T) она обеспечивает меньшую ошибку оценки Q(t), однако ошибка определения расстояния до очага возрастает до 25,73%, что соответствует MAE около 33,5 м, что делает данную конфигурацию худшей для оценки места расположения очага (табл. 4.6). Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры в точках измерения также возрастает с 5,22 до 10,42 °C. Это показывает, что одиночный канал измерения концентрации CO сам по себе не обеспечивает устойчивой локализации очага и недостаточен для восстановления температурной динамики, хотя содержит полезную информацию об интенсивности пожара и несколько снижает ошибку прогноза концентрации CO.

Добавление второй пространственной точки измерения температуры позволяет снизить ошибки всех целевых переменных относительно 1(T): при

использовании конфигурации 2(T) ошибка по расстоянию уменьшается на 50,6%, а по текущей мощности тепловыделения ошибка уменьшается с 673,84 до 436,24 кВт. В дополнение к этому, значительное снижение ошибки наблюдается также и по прогнозу температуры - на 41,8%, что указывает на важность пространственной информации для описания распространения температурного возмущения.

Таблица 4.6 – Ошибки оценки и прогнозирования параметров пожара для различных измерительных конфигураций

Измерительная конфигурация	**D, MAE, м**	**D, NMAE, %**	**Q(t), MAE, кВт**	**Q(t), NMAE, %**	**T(t+Δ), MAE, °C**	**T(t+Δ), NMAE, %**	**CO(t+Δ), MAE, ppm**	**CO(t+Δ), NMAE, %**
1(T)	30,13	23,18	673,84	6,47	5,22	1,33	7,96	3,09
1(CO)	33,45	25,73	351,52	3,38	10,42	2,65	4,98	1,93
1(T+CO)	8,41	6,47	236,83	2,28	3,93	1,00	3,67	1,43
2(T)	14,89	11,45	436,24	4,19	3,04	0,77	5,53	2,15
2(CO)	17,86	13,74	263,80	2,53	5,82	1,48	3,27	1,27
2(T+CO)	4,36	3,35	140,98	1,35	2,65	0,67	2,43	0,94
3(T+CO)	4,28	3,29	137,44	1,32	2,55	0,65	2,34	0,91

Аналогичная двухточечная конфигурация, состоящая только из каналов измерения концентрации оксида углерода 2(CO), демонстрирует другую картину. При переходе от 2(T) к 2(CO) ошибка по текущей мощности тепловыделения снижается на 39,5%, однако ошибка по расстоянию до очага возрастает с 11,45% до 13,74%. Вместе с тем конфигурация 2(CO) обеспечивает меньшую ошибку прогноза концентрации CO по сравнению с 2(T). Следовательно, канал CO является информативным для оценки газовой обстановки и текущей мощности тепловыделения, тогда как температурный канал остаётся необходимым для более устойчивой локализации очага и прогноза температурного поля.

Совместное измерение температуры и концентрации оксида углерода существенно улучшает результаты уже в конфигурации с одной точкой измерения, причем по всем основным целевым переменным. Для конфигурации 1(T+CO) NMAE составляет 6,47% по D и 2,28% по Q(t), что

заметно ниже, чем при использовании только температуры или только концентрации CO в одной точке. Особенно значимым является снижение ошибки оценки расстояния до очага: относительно конфигурации 1(T) ошибка уменьшается примерно в 3,6 раза, а относительно 1(CO) - примерно в 4,0 раза. Ошибка оценки текущей мощности тепловыделения Q(t) при этом снижается примерно в 2,8 раза относительно 1(T) и в 1,5 раза относительно 1(CO). Это говорит о необходимости совместного учёта температуры и концентрации оксида углерода для более точной локализации очага и оценки интенсивности пожара.

Вместе с тем конфигурация 1(T+CO) не дает в явном виде пространственной информации о распределении контролируемых параметров, поскольку измерения проводятся только в одной точке пространства выработки. Такая схема не позволяет формировать такие признаки как пространственные разности между точками измерений, дискретные градиенты или временные задержки, характеризующие скорость распространения возмущений.

В связи с этим, добавление еще одной точки измерения повышает информативность конфигурации. Переход от 1(T+CO) к 2(T+CO) приводит к дальнейшему снижению ошибки по всем рассматриваемым целевым переменным: наиболее выраженный эффект наблюдается при оценке расстояния до очага, где ошибка уменьшается примерно в 2 раза. Ошибка оценки мощности тепловыделения снижается примерно в 1,7 раза, а ошибки прогноза температуры и концентрации CO - примерно в 1,5 раза. При этом 2(T+CO) является первой среди рассмотренных конфигураций, при использовании которой средние абсолютные ошибки одновременно составляют менее 5 м при определении расстояния до очага, менее 150 кВт при оценке текущей мощности тепловыделения и менее 5 °C при прогнозировании температуры. Наличие двух пространственно-разнесенных точек измерения делает данную конфигурацию также более устойчивой к деградации одного из измерительных каналов и локальным возмущениям,

что характерно для реальных условий эксплуатации систем мониторинга.

При переходе к конфигурации 3(T+CO) наблюдается дальнейшее повышение точности, однако, как видно из рис. 4.3 и 4.4, прирост уже не имеет столь выраженного характера, как при переходе от одноточечных и одноканальных схем к конфигурации 2(T+CO).

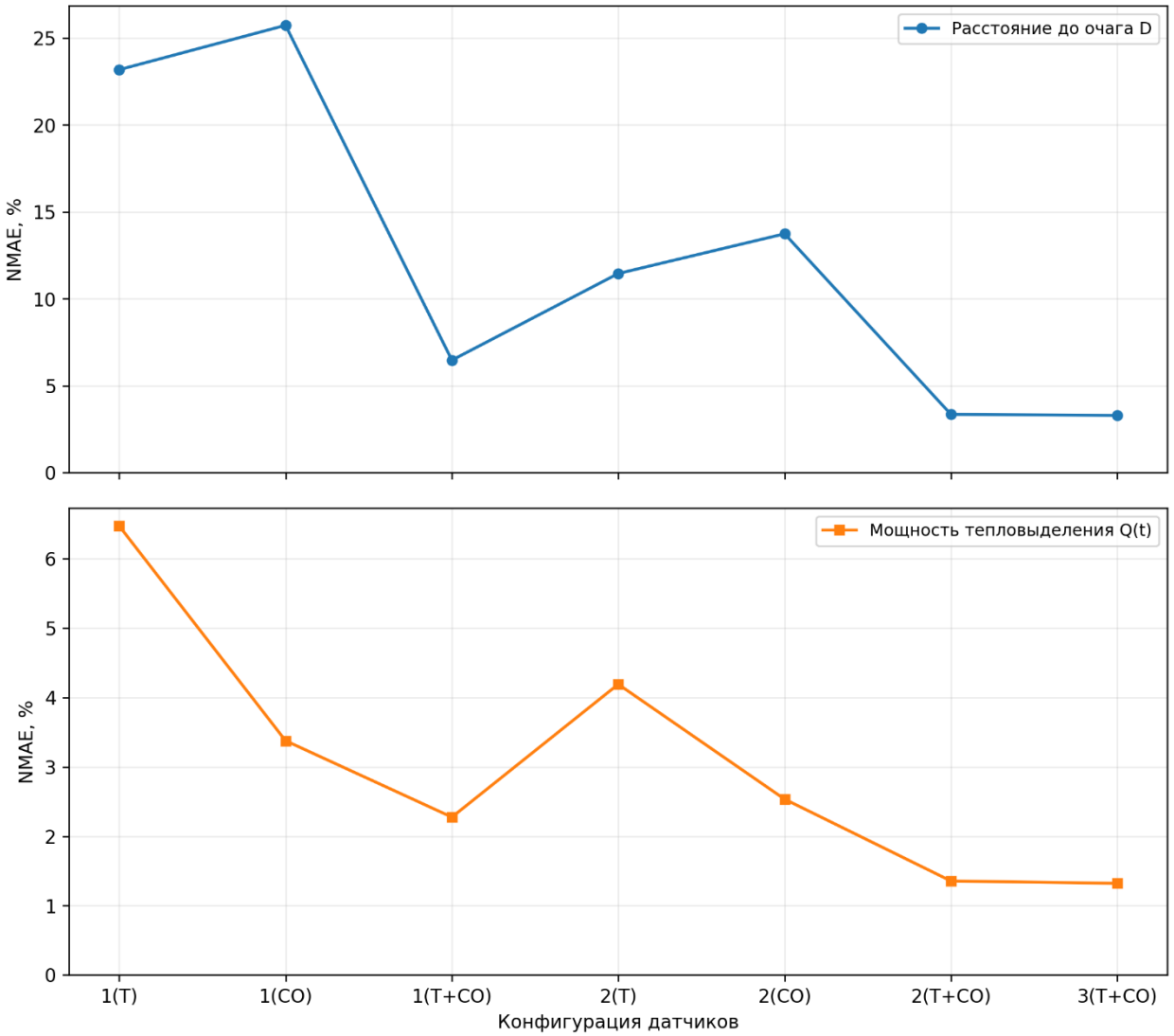

Рис. 4.3 – Нормированная средняя ошибка модели при оценке расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения в зависимости от измерительной конфигурации

По сравнению с 2(T+CO) ошибка оценки расстояния до очага, прогноза температуры и прогноза CO уменьшается незначительно - на 1,8% для расстояния и примерно на 3,6% для обоих прогнозируемых показателей. Для мощности тепловыделения средняя ошибка снижается на 2,5%.

Следовательно, конфигурация 2(T+CO) может рассматриваться как рационально достаточная по соотношению точности и сложности, обеспечивающая основной прирост информативности, тогда как конфигурация 3(T+CO) дает дополнительный запас точности и пространственной избыточности.

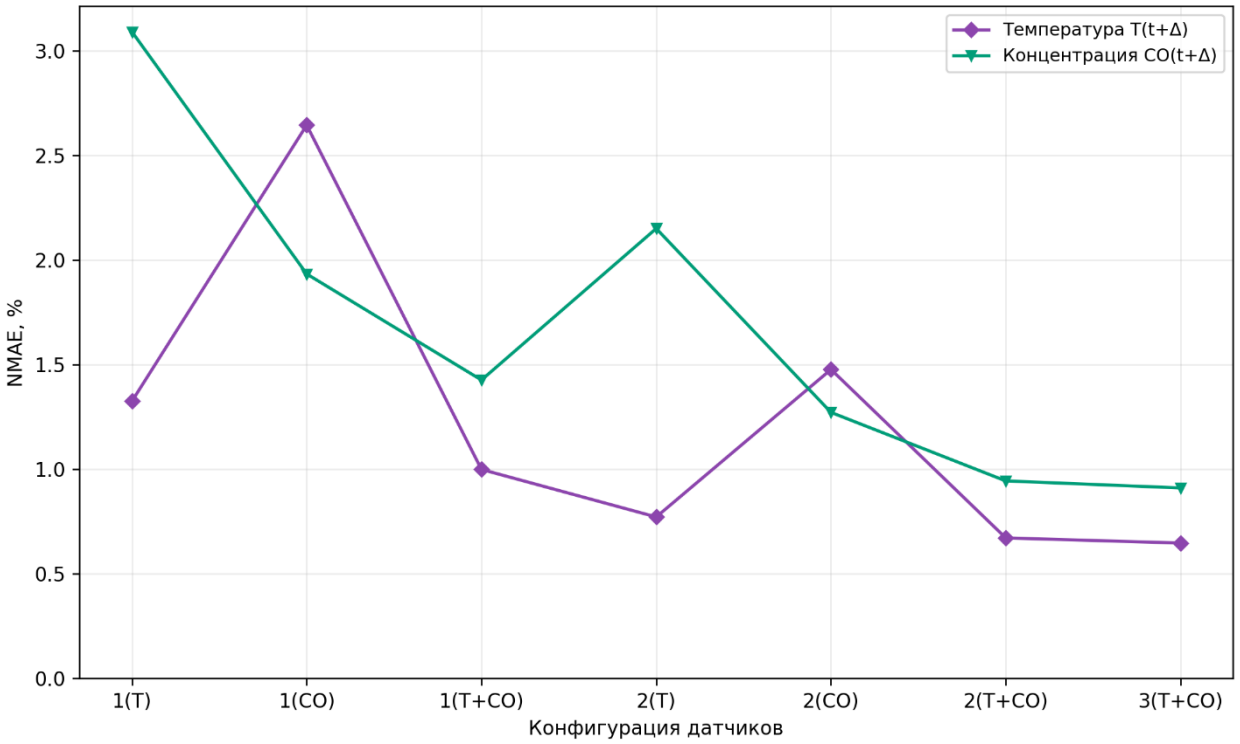

Рис. 4.4 – Нормированная средняя ошибка модели при прогнозе температуры и концентрации CO в зависимости от измерительной конфигурации

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в исследованном классе измерительных схем конфигурация 2(T+CO) является рационально достаточной по соотношению точности и сложности локальной измерительной схемой для совместной оценки расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения и краткосрочного прогноза температуры и концентрации CO. По сравнению с одноточечными и одноканальными конфигурациями данная схема обеспечивает качественное повышение точности за счёт одновременного использования температурного и газового каналов в двух пространственно-разнесённых точках контроля. Н Добавление третьей точки измерения дополнительно улучшает результаты и

повышает пространственную избыточность системы, однако прирост точности по большинству целевых переменных носит уже уточняющий характер.

Однако, при переходе к более протяженным выработкам важны также вопросы о пространственном масштабе измерительной конфигурации, включая расстояние между измерительными пунктами и закономерность увеличения их числа при дальнейшем росте длины контролируемой зоны.

Полученные ранее результаты показали выраженное уменьшение температуры над фоновым значением по мере удаления от очага пожара, для части режимов удовлетворительно описываемое экспоненциальной зависимостью

$$\Delta T(d) = \Delta T_0 e^{-\beta d} \tag{4.9}$$

где d – расстояние от очага, ΔT_0 - превышение температуры над фоновым значением при $d = 0$, β - коэффициент температурного затухания.

Для двух расположенных по ходу вентиляционной струи точек, обозначим расстояние от очага до первого пункта измерения через d_1, а расстояние между первым и вторым пунктом через s. Тогда пространственную разность избыточных температур в данном случае можно определить как

$$\Delta T_{12} = \Delta T(d_1) - \Delta T(d_1 + s) = \Delta T_0 e^{-\beta d_1}\left(1 - e^{-\beta s}\right) \tag{4.10}$$

Данный пример показывает, что при увеличении расстояния от очага абсолютная температурная разность между близко расположенными пунктами уменьшается, что требует увеличения расстояния s для сохранения пространственной различимости сигнала. Концентрация CO имеет более слабый пространственный градиент в дальней зоне, однако сохраняет информативный уровень на большей протяжённости и дополняет температурный канал дополнительной информацией, полезной как для обратной, так и для прогностической задач. В связи с этим при определении рекомендуемого расстояния между пунктами измерений s учитывались результаты вычислительных экспериментов с совместным использованием

временных рядов температуры и концентрации CO.

Для конфигурации 2(T+CO) рекомендуемое расстояние между пунктами измерения зависит от длины контролируемого участка выработки и может быть представлено в виде

$$s_{2,\text{рек}} = f_2(L) \tag{4.11}$$

где L - длина контролируемого участка, $s_{2,\text{рек}}$ – рекомендуемое расстояние между двумя измерительными пунктами.

При выборе $s_{2,\text{рек}}$ предпочтение отдавалось большему пространственному разнесению пунктов при сохранении приемлемых ошибок и возможности расположения обоих пунктов по ходу вентиляционной струи относительно рассматриваемой области возможного очага.

По результатам вычислительных экспериментов при увеличении L от 100 до 300 м рациональное расстояние между пунктами увеличивалось приблизительно от 20 м до 140-150 м, для участков длиной около 150 м рациональной являлась область 30-40 м, около 200 м – 50-60 м, около 250 м – 100-120 м. При длине порядка 300 м расстояние 140-150 м обеспечивало хорошую точность при различных положениях очага. При s = 150 м средняя абсолютная ошибка определения расстояния до очага пожара составляла около 4,8 м, а MAE определения мощности тепловыделения - около 0,13 МВт.

При дальнейшем увеличении длины участка сохранение только двух пунктов требовало их разнесения до 180-200 м, при этом повышалась чувствительность результата к положению очага. Поэтому после достижения расстояния порядка 150 м (обозначим его как s_0) дальнейшее масштабирование целесообразно осуществлять увеличением числа измерительных пунктов. В обобщенном виде полученную зависимость можно представить как

$$s_{\text{рек}}(L) = \min[f_2(L), s_0] \tag{4.12}$$

Назначением дополнительных физических пунктов при увеличении

длины выработки является прежде всего расширение области контроля с сохранением точности решения задачи. Если последний измерительный пункт размещён на расстоянии m от конца контролируемого участка (например, 10 м от сопряжения с другой выработкой), а остальные пункты имеют шаг s_0, минимальное требуемое число пунктов определяется выражением

$$N_{min}(L) = \max\left[2,\ 1 + \left\lceil \frac{L - m - d_{\text{пред}}}{s_0} \right\rceil\right] \tag{4.13}$$

где $d_{\text{пред}}$ - предельно допустимое расстояние от возможного места расположения очага до ближайшего к нему пункта измерения, s_0 - шаг регулярного размещения соседних измерительных пунктов.

Таким образом, рассматриваемая схема масштабирования определяется совокупностью двух зависимостей: рационального расстояния между пунктами $s_{2,\text{рек}}$ для двухточечной конфигурации и минимального числа пунктов $N_{min}(L)$ после достижения предельного шага порядка 150 м.

Помимо протяженности контролируемой зоны также рассматривались возможные направления переноса продуктов горения при развитии пожара в горной выработке. В частности, при сохранении общего направления вентиляционного потока возможно обратное распространение дымового слоя вдоль кровли под действием сил плавучести (backlayering) [122, 123].

В качестве такого примера из тестовой выборки рассмотрен сценарий пожара на участке горизонтальной выработки длиной 300 м с пиковой мощностью тепловыделения 3 МВт и начальной скоростью движения воздуха 1 м/с. В данном случае очаг пожара располагался в 100 м от начала участка, а точки измерения температуры и концентрации CO в 140 и 170 м после очага по направлению вентиляционной струи, на 0,3 м ниже кровли. Данные с указанных точек измерения 2(T+CO) за предшествующие 30 с использовались для решения обратной задачи, а также прогноза температуры (рис. 4.5) и концентрации CO (рис. 4.6) через 60 с на высоте 1,7 м в 57 точках,

заданных с шагом 5 м вдоль выработки.

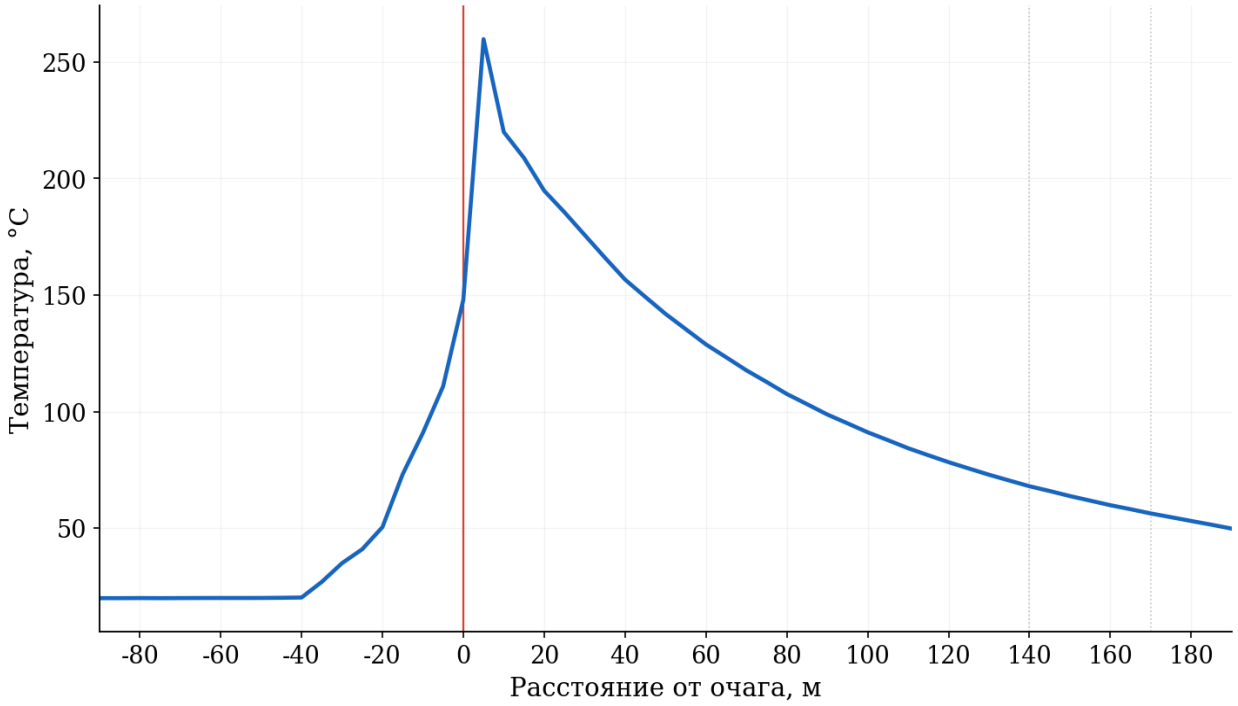

Рис. 4.5 – Прогноз распределения температуры относительно очага пожара в заданных контрольных точках на высоте 1,7 м

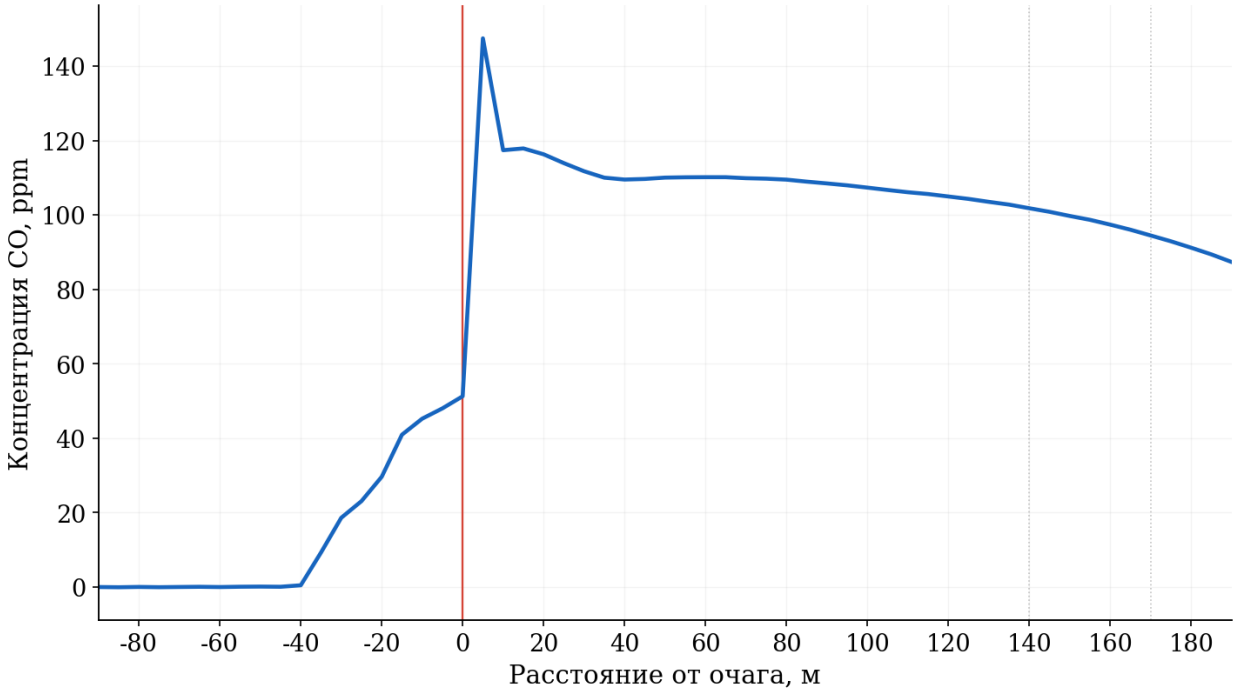

Рис. 4.6 – Прогноз распределения концентрации CO относительно очага пожара в заданных контрольных точках на высоте 1,7 м

Прогноз производился на момент времени, соответствующий 320 с от фактического начала пожара по измерениям за интервал 230-260 с. В этот период наблюдалось обратное распространение дымового слоя. На рисунках координаты отсчитываются от фактического положения очага, отмеченного красной вертикальной прямой, а положительное направление соответствует исходному направлению вентиляционной струи.

Для измерительных окон, заканчивающихся в интервале 240-330 с, средняя абсолютная ошибка оценки мощности тепловыделения составила 176 кВт, а расстояния до очага - 4,13 м. Средние абсолютные ошибки прогноза температуры и концентрации CO через 60 с рассчитывались по всем 57 контрольным точкам и составили соответственно 3,24 °C и 3,47 ppm.

При некоторых условиях, характерных для наклонных выработок с нисходящим проветриванием может возникать и полное опрокидывание воздушной струи [124, 125]. Для проверки работы метода в таких условиях отдельно исследован случай опрокидывания струи в наклонной выработке с уклоном -9° при пожаре с пиковой мощностью тепловыделения 4 МВт и начальной скоростью движения воздуха 1 м/с. Основные точки измерения температуры и концентрации CO располагались на расстояниях 80 и 110 м от очага по изначальному направлению вентиляционной струи. Также использовалась расширенная схема с дополнительным постом измерения температуры и концентрации CO, расположенным в 60 м от очага с противоположной стороны.

Прогнозные распределения температуры и концентрации CO, полученные с использованием расширенной схемы измерений, приведены на рис. 4.7 и 4.8 соответственно. Окно измерений также составляло 30 с при горизонте прогноза 60 с. Прогнозируемые значения определялись на высоте 1,7 м в заданных точках с шагом 5 м. Как и в предыдущем примере положительное направление соответствует исходному направлению вентиляционной струи.

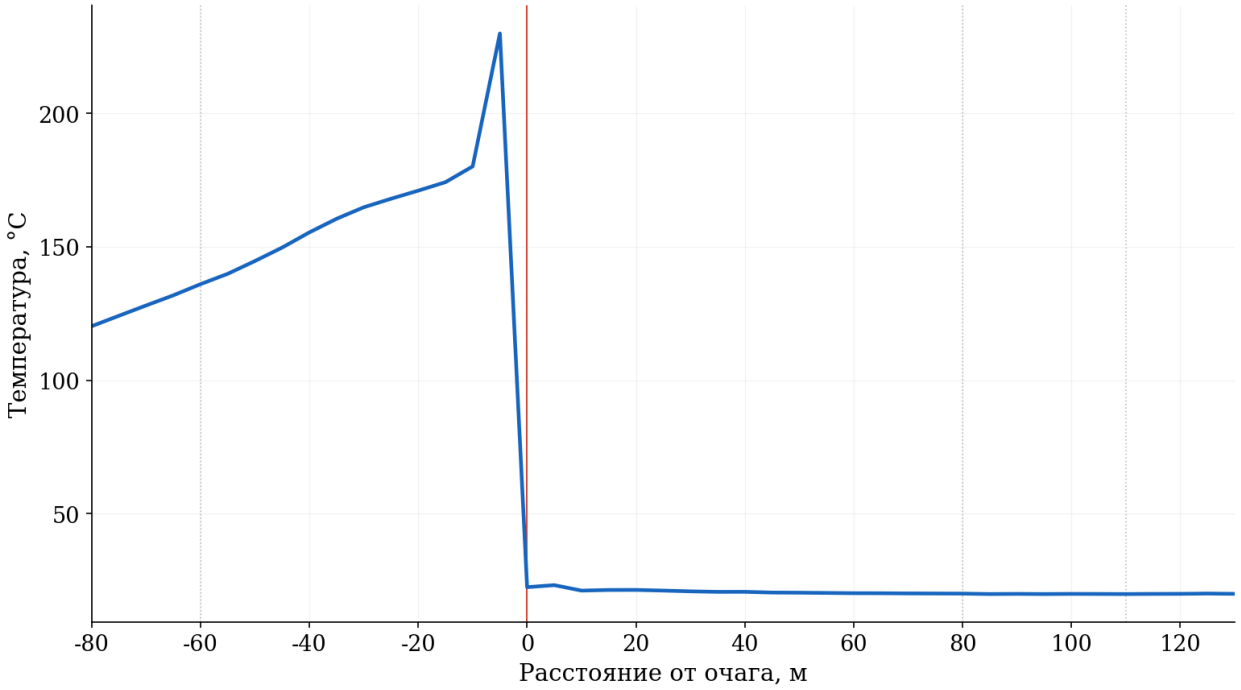

Рис. 4.7 – Прогноз распределения температуры на высоте 1,7 м при опрокидывании вентиляционной струи

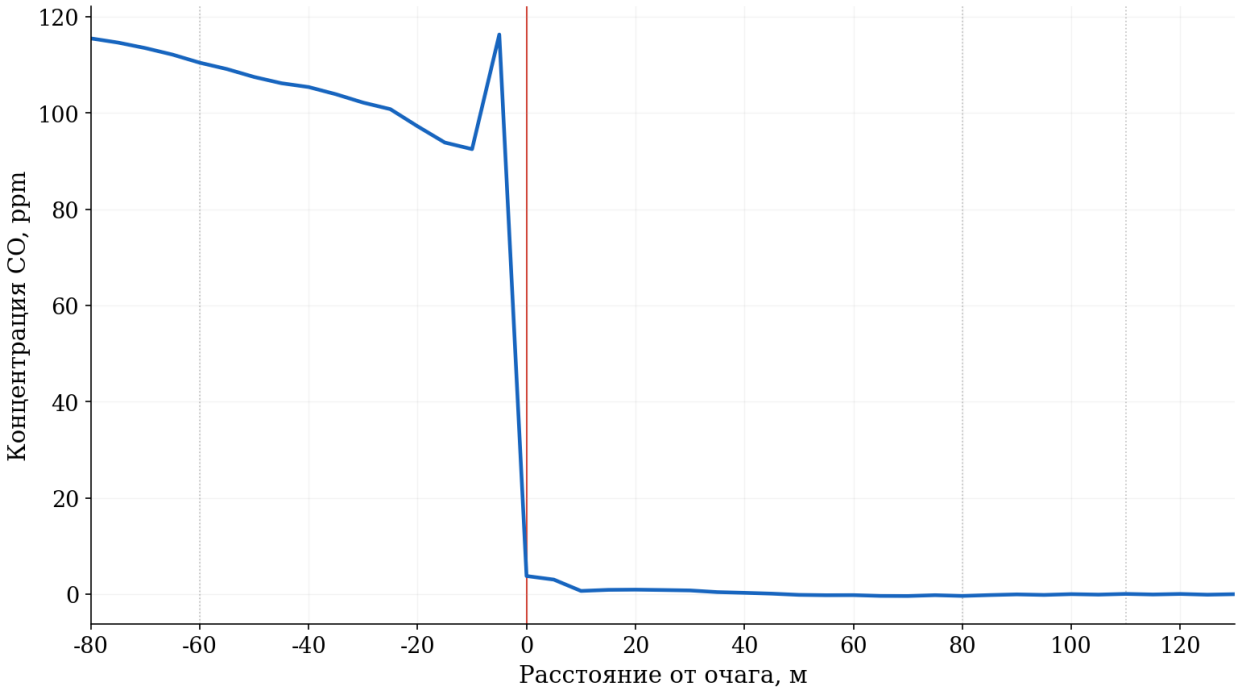

Рис. 4.8 – Прогноз распределения концентрации CO на высоте 1,7 м при опрокидывании вентиляционной струи

Как видно из рис. 4.7 и 4.8 после опрокидывания струи преимущественный перенос продуктов горения происходит в противоположную сторону. Основные точки измерения оказываются со

стороны, противоположной этому переносу, что способствует снижению их информативности. В этом случае целесообразно использовать дополнительный пост измерения, размещенный с другой стороны очага.

Таблица 4.7 – Средние абсолютные ошибки оценки параметров пожара и прогноза температуры и концентрации CO

Сценарий	Обратное распространение дымового слоя	Опрокидывание вентиляционной струи	Опрокидывание вентиляционной струи
Схема измерений	2(T+CO)	2(T+CO)	2(T+CO) с дополнительным постом со стороны входа
Мощность тепловыделения, MAE, кВт	176	551,6	335,4
Расстояние до очага, MAE, м	4,13	4,69	3,70
Прогнозируемая температура, MAE, °C	3,24	5,25	3,98
Прогнозируемая концентрация CO, MAE, ppm	3,47	6,13	4,59

Как видно из табл. 4.7, в рассмотренном случае опрокидывания исходная двухточечная конфигурация позволяла решать обратную задачу и прогнозировать распределения температуры и концентрации CO, хотя ошибка оценки мощности тепловыделения была существенно выше по сравнению с рассмотренным до этого случаем без опрокидывания. Однако, использование дополнительного поста позволило снизить среднюю абсолютную ошибку оценки мощности тепловыделения с 551,6 до 335,4 кВт, а расстояния до очага с 4,69 до 3,70 м. Данные оценки производились на интервале на интервале 160-190 с от возникновения пожара, после момента опрокидывания струи. Одновременно ошибка прогноза температуры уменьшилась с 5,25 до 3,98 °C, концентрации CO с 6,13 до 4,59 ppm. Приведённые результаты иллюстрируют работу метода при различных направлениях переноса продуктов горения. Дополнительный пост может рассматривается как условное дополнение к базовой двухточечной схеме ля

повышения точности оценки и прогноза при возможности опрокидывания струи в наклонных выработках с нисходящим проветриванием.

По результатам исследования в рассматриваемой постановке задачи рационально достаточной базовой измерительной конфигурацией по соотношению точности и сложности для совместной оценки расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения и краткосрочного прогноза температуры и концентрации CO является двухточечная схема с измерением температуры и концентрации оксида углерода в каждой точке. Применение такой схемы для протяженных горных выработок предполагает выбор размещения точек измерения с учётом длины контролируемого участка и возможности изменения направления переноса продуктов горения. Добавление третьего локального поста дополнительно повышает точность, однако основной прирост качества достигается при переходе к двухточечной схеме.

4.5. Практические рекомендации по применению разработанного метода

Разработанный метод предназначен для получения количественных сведений о пожаре по доступным во время аварии данным с использованием ограниченного набора измерений параметров рудничной атмосферы. Использование метода позволяет дополнить имеющиеся сведения о возникшем пожаре оценками текущей мощности тепловыделения и положения очага, а также прогнозом температуры и концентрации CO в заданных точках выработки.

Применение метода целесообразно на участках горных выработок с сосредоточенной пожарной нагрузкой, в том числе в местах эксплуатации самоходного оборудования, размещения электроустановок и транспортирования горючих материалов. Основными направлениями использования результатов являются информационное обеспечение принятия решений в первоначальный период развития пожара, разработка и

корректировка оперативных планов и уточнение исходных данных для расчета последствий пожара в вентиляционной сети с использованием специализированных программных комплексов, в том числе для расчета аварийных вентиляционных режимов.

Оперативная оценка и прогноз обстановки на аварийном участке. В случае обнаружения признаков пожара на контролируемом участке данные автоматизированного контроля параметров рудничной атмосферы поступают в расчетный модуль. С учётом известных геометрических характеристик выработки, расположения точек измерения и условий проветривания определяются оценки текущей мощности тепловыделения и положения очага, а также рассчитывается прогноз изменения температуры и концентрации CO в заданных точках пространства выработки.

По мере накопления результатов измерений значения расчетных параметров периодически обновляются. Использование обновляемых временных окон позволяет последовательно уточнять характеристики пожара и прогнозные значения температуры, а также концентрации CO. Особое значение имеет возможность прогнозирования в заданных контрольных точках, в которых непосредственные измерения температуры или концентрации CO отсутствуют или невозможны. Это позволяет дополнить текущие измерения пространственным распределением контролируемых параметров и оценивать ожидаемое развитие обстановки на аварийном участке.

Реализацию метода рекомендуется предусматривать в виде расчетного модуля, использующего данные автоматизированной системы контроля параметров рудничной атмосферы с представлением результатов на автоматизированном рабочем месте (АРМ) горного диспетчера, а также возможностью их вывода на информационные средства командного пункта (КП) при ликвидации аварии. Расчётная информация должна включать идентификатор аварийного участка, время обновления расчета, оценённые параметры очага, текущие и прогнозные значения температуры и CO в

заданных точках или их графическое представление с указанием горизонта прогнозирования.

Информационное обеспечение горноспасательных работ и разработки оперативных планов по локализации и ликвидации аварии. Особое значение результаты применения разработанного метода имеют в первоначальный период возникновения пожара, когда первыми к аварийному участку могут прибывать члены вспомогательных горноспасательных команд (ВГК), выполняющие мероприятия по спасению людей и локализации аварии до прибытия подразделений профессиональных горноспасательных служб.

Необходимость своевременного предоставления информации подтверждается результатами проведенных контрольно-тактических учений на угольных шахтах, в ходе которых выявлены недостатки при постановке задач отделениям ВГК, включая неполное доведение информации о возможных направлениях распространения аварии, вентиляционном режиме, газовой обстановке и температуре на аварийном участке. Значимость первоначальных действий ВГК подтверждает также случай локализации пожара 10 мая 2022 года в конвейерном штреке 48-8 шахты «Ерунаковская-VIII», при котором очаг был локализован членами ВГК до прибытия отделений ВГСЧ [126].

Предлагаемый метод позволяет предоставлять руководителю работ по ликвидации аварии (РЛА) и руководителю горноспасательных работ (РГСР) количественные оценки положения и интенсивности пожара, а также ожидаемые распределения значений температуры и концентраций CO на аварийном участке. Эти сведения могут использоваться при подготовке заданий горноспасательным отделениям, предварительной оценке условий ведения горноспасательных работ и определении участков, требующих дополнительного контроля.

Результаты оценки и прогноза могут также учитываться вместе с другими сведениями о пожаре в горной выработке при выборе мероприятий по его тушению, в том числе при предварительной оценке возможности

активного тушения с присутствием людей или дистанционно, а также рассмотрении изоляционного и комбинированного способов.

Особое значение имеет прогноз температуры воздуха, определяющей ограничения на ведение горноспасательных работ в непригодной для дыхания атмосфере. Например, при температуре 39 °С предельное время непрерывного пребывания профессиональных горноспасателей без средств противотепловой защиты составляет 20 мин при работе на месте и 15 мин при передвижении. При этом привлечение членов ВГК к горноспасательным работам в зоне высоких температур с непригодной для дыхания атмосферой не допускается [34, 127]. Прогноз температуры в заданных точках пространства выработки позволяет заблаговременно оценивать зоны высоких температур и уточнять планируемые мероприятий с учётом установленных ограничений.

В соответствии с п. 15-17 приказа Ростехнадзора № 520 при изменении аварийной обстановки в ходе выполнения мероприятий ПЛА либо необходимости продолжения горноспасательных работ после их выполнения РЛА и РГСР разрабатывают оперативный план на основании поступающей на командный пункт информации, анализа обстановки и прогноза развития аварии [127]. В этой связи, по мере развития аварии и поступления новых данных, обновляемые результаты оценки параметров пожара и прогноза опасных факторов пожара могут использоваться для отслеживания тенденций развития аварии и учитываться при разработке или корректировке оперативных планов.

Использование результатов в расчётных моделях вентиляционных сетей. Оцениваемые положение и мощность тепловыделения пожара могут использоваться для уточнения исходных данных при расчёте распространения продуктов горения и изменения воздухораспределения в вентиляционной сети.

В таком случае разработанный метод обеспечивает оценку неизвестных характеристик пожара по доступным данным, а также локальный прогноз

пространственного распределения температуры и концентрации CO в пределах контролируемой выработки, а сетевая модель на основе полученных данных осуществляет расчёт последствий аварии для системы горных выработок в целом. Передача результатов предусматривает согласование характеристик источника тепловыделения с параметрами сетевой модели. Такой подход сокращает неопределенность при задании исходных данных для сетевых расчетов и создаёт возможность прогнозирования сценариев развития аварии в разветвленной системе выработок на основании текущей динамики пожара.

Таким образом, разработанный метод позволяет по ограниченному набору измерений с учётом известных характеристик выработки оценивать неизвестные параметры пожара и прогнозировать пространственное распределение температуры и концентрации CO в пределах контролируемой выработки. Получаемые по мере развития аварии результаты позволяют уменьшить неопределённость при оценке пожарной обстановки и обеспечивают информационную основу для оценки условий эвакуации людей и проведения горноспасательных работ, выбора и корректировки мероприятий по локализации и ликвидации пожара, а также расчёта его последствий.

Выводы по главе

1. Установлено, что совместное использование временных окон показаний температуры и концентрации CO, продольной скорости вентиляционного потока и угла наклона выработки обеспечивает достаточную информативность входных данных для оперативной оценки скрытых параметров пожара, таких как текущая мощность тепловыделения и его положение в протяженной горной выработке, выраженное расстоянием до очага пожара. Разработанный на этой основе метод, реализованный с применением нейросетевой модели, позволяет определять указанные

параметры пожара в протяженной горной выработке со средними абсолютными ошибками менее 150 кВт и 5 м соответственно.

2. Также показано, что указанная структура входных данных может быть использована для краткосрочного прогноза значений опасных факторов пожара в протяженной горной выработке, таких как температура и концентрация CO. Разработанный метод, использующий нейросетевую аппроксимацию зависимостей, позволяет прогнозировать данные параметры в заданных точках выработки на горизонте 60 с со средними абсолютными ошибками не более чем 4,5 °C и 3 ppm соответственно.

3. Для совместного решения задач оперативной оценки мощности тепловыделения пожара, расстояния до очага и прогнозирования значений температуры и концентрации CO в заданных точках выработки целесообразно использовать пространственно-разнесённые точки измерения с совместной регистрацией температуры и концентрации CO в каждой из точек. Рационально достаточной по соотношению точности и сложности при совместном решении указанных задач является такая конфигурация с двумя точками измерений. По сравнению с лучшей для каждого показателя одноточечной одноканальной схемой она обеспечивает снижение ошибки определения расстояния до очага примерно в 6,9 раза, оценки текущей мощности тепловыделения в 2,5 раза, а прогноза температуры и концентрации CO - примерно в 2 раза. Добавление третьей точки измерения обеспечивает наилучшую точность среди рассмотренных конфигураций, дополнительно снижая средние ошибки. Вместе с тем данный прирост является умеренным: снижение ошибок составляет лишь около 2-4 %.

4. С практической точки зрения совместная оценка расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения и прогноз пространственного распределения значений температуры и концентрации CO в горных выработках могут использоваться для информационного обеспечения оценки условий эвакуации людей и проведения горноспасательных работ, выбора и корректировки мероприятий по локализации и ликвидации пожара, а также

для уточнения исходных данных при расчёте последствий пожара в вентиляционной сети шахты в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной для горной отрасли научной задачи разработки метода оперативной оценки мощности тепловыделения и расстояния до очага пожара, а также совместного прогнозирования опасных факторов пожара в горных выработках, в том числе наклонных, по данным ограниченной конфигурации измерений температуры и концентрации CO, что позволяет повысить уровень пожарной безопасности при ведении подземных горных работ.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. При пожаре в горной выработке в случае нисходящего проветривания (отрицательные углы наклона) происходит выраженное замедление фронта опасных факторов вследствие встречного действия сил термогравитационной плавучести. При этом максимальное увеличение среднего времени прибытия фронта оксида углерода (CO) наблюдается при угле наклона -20° и достигает 11,4% в исследованных условиях. В то же время положительные углы наклона оказывают лишь умеренное ускоряющее воздействие (в пределах 3-4%), что говорит об асимметричном характере взаимодействия вынужденной и естественной конвекции в наклонных выработках.

2. Выявлено несовпадение условий экстремумов стратификации для теплового и концентрационного полей. Максимум средней температурной стратификации достигается при малом положительном угле наклона θ = +5°, тогда как для оксида углерода этот максимум находится в области отрицательных значений θ = -5°. При θ = -20° зафиксировано практически полное исчезновение температурной разницы между верхней и нижней зонами выработки, при этом вертикальная неоднородность по оксиду углерода сохраняется, хотя и значительно снижается относительно горизонтального случая.

3. Температура и концентрация CO имеют различный характер продольного распределения вдоль выработки. Среднее превышение температуры над фоном монотонно уменьшается при удалении от очага пожара, сохраняя выраженный продольный градиент даже на расстояниях порядка 200 м. В отличие от температуры, концентрация CO в ближней зоне быстро снижается, а затем выходит на близкий к постоянному уровень вследствие влияния турбулентной диффузии и выравнивания концентрации по сечению. Таким образом, температурные данные содержат информацию об удалённости от очага, тогда как концентрация CO отражает перенос продуктов горения и может использоваться как дополнительный информативный признак при оценке развития пожара, в том числе на удалённых участках выработки.

4. Показано, что скорость вентиляционного потока существенно влияет на форму продольного температурного профиля. При скоростях 1,0–2,0 м/с среднее превышение температуры на нисходящем участке профиля удовлетворительно описывается простой экспоненциальной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 > 0{,}95$. При увеличении скорости до 2,5–5,0 м/с температурный профиль изменяется качественно: в ближней области наблюдается более резкое начальное снижение температуры после максимума, сменяющееся более пологим затуханием в дальней области, при этом для части режимов максимум средней температуры смещается по направлению потока. Это указывает на целесообразность учёта скорости вентиляции при интерпретации температурных измерений и при формировании входных признаков модели оценки параметров пожара.

5. Установлено, что совместное использование временных окон показаний температуры и концентрации CO, продольной скорости вентиляционного потока и угла наклона выработки обеспечивает достаточную информативность входных данных для оперативной оценки скрытых параметров пожара, таких как текущая мощность тепловыделения и его положение в протяженной горной выработке, выраженное расстоянием

до очага пожара. Разработанный на этой основе метод, реализованный с применением нейросетевой модели, позволяет определять указанные параметры пожара в протяженной горной выработке со средними абсолютными ошибками менее 150 кВт и 5 м соответственно.

6. Также показано, что указанная структура входных данных может быть использована для краткосрочного прогноза значений опасных факторов пожара в протяженной горной выработке, таких как температура и концентрация CO. Разработанный метод, использующий нейросетевую аппроксимацию зависимостей, позволяет прогнозировать данные параметры в заданных точках выработки на горизонте прогнозирования 60 с со средними абсолютными ошибками не более чем 5 °C и 3 ppm соответственно.

7. Для совместного решения задач оперативной оценки мощности тепловыделения пожара, расстояния до очага и прогнозирования значений температуры и концентрации CO в заданных точках выработки целесообразно использовать пространственно-разнесённые точки измерения с совместной регистрацией температуры и концентрации CO в каждой из точек. Рационально достаточной по соотношению точности и сложности при совместном решении указанных задач является такая конфигурация с двумя точками измерений. По сравнению с лучшей для каждого показателя одноточечной одноканальной схемой она обеспечивает снижение ошибки определения расстояния до очага примерно в 6,9 раза, оценки текущей мощности тепловыделения в 2,5 раза, а прогноза температуры и концентрации CO - примерно в 2 раза. Добавление третьей точки измерения обеспечивает наилучшую точность среди рассмотренных конфигураций, дополнительно снижая средние ошибки. Вместе с тем данный прирост является умеренным: снижение ошибок составляет лишь около 2-4 %.

8. С практической точки зрения совместная оценка расстояния до очага, текущей мощности тепловыделения и прогноз пространственного распределения значений температуры и концентрации CO в горных

выработках могут использоваться для информационного обеспечения оценки условий эвакуации людей и проведения горноспасательных работ, выбора и корректировки мероприятий по локализации и ликвидации пожара, а также для уточнения исходных данных при расчёте последствий пожара в вентиляционной сети шахты в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu, X. Development status of coal mining in China / X. Liu, L. Li, Y. Yang // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2023. – Vol. 123. – № 1. – P. 19-27.

2. Мешков, Г. Б. Итоги работы угольной промышленности за 2023 год / Г. Б. Мешков, И. Е. Петренко, Д. А. Губанов // Уголь. – 2024. – № 3 (1178). – С. 18-29.

3. Кабанов, Е. И. Анализ риска аварий на угольных шахтах с учетом человеческого фактора / Е. И. Кабанов // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 48-54.

4. Баловцев, С. В. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах / С. В. Баловцев, О. В. Скопинцева, Е. Ю. Куликова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 2 (56). – С. 234-245.

5. Safety hazards in coal mines of Guizhou China during 2011–2020 / B. Kong, Z. Cao, T. Sun [et al.] // Safety Science. – 2022. – Vol. 145. Article 105493.

6. Wang, Y.-J. Analysis of Characteristics of Roof Fall Collapse of Coal Mine in Qinghai Province, China / Y.-J. Wang, L.-S. Zhao, Y.-S. Xu // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 3. Article 1184.

7. Баловцев, С. В. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах / С. В. Баловцев, О. В. Скопинцева, Е. Ю. Куликова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2 (52). – С. 276-285.

8. Федоткин, И. О. Ключевые факторы угледобычи в ведущих странах мира / И. О. Федоткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 153-167.

9. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 25.02.2026). –

Текст : электронный.

10. Уварова, В. А. Показатели пожароопасности полимерных материалов, применяемых при угледобыче подземным способом / В. А. Уварова // Пожарная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 126-130.

11. Düzgün, H. S. Analysis of soma mine disaster using causal analysis based on systems theory (CAST) / H. S. Düzgün, N. Leveson // Safety Science. – 2018. – Vol. 110. – P. 37-57.

12. Numerical and experimental investigation of carbon monoxide spread in underground mine fires / L. Zhou, L. Yuan, D. Bahrami [et al.] // Journal of Fire Sciences. – 2018. – Vol. 36. – № 5. – P. 406-418.

13. Рыбичев, А. А. К вопросу оценки влияния тяжелых углеводородов на взрывчатость пылеметановоздушных смесей / А. А. Рыбичев // Уголь. – 2023. – № 2. – С. 41-44.

14. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China / Y. Zhu, D. Wang, Z. Shao [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – Vol. 121. – P. 357-366.

15. Ганова, С. Д. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности / С. Д. Ганова, О. В. Скопинцева, О. Н. Исаев // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 109-115.

16. Родионов, В. А. Мультипликативный метод оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов / В. А. Родионов, А. С. Серегин, Д. А. Иконников // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 35-40.

17. Experimental study on gas and coal dust explosive overpressure and flame dynamic characteristics in an engineering-level test roadway / Y. Niu, R. Si, Z. Li [et al.] // Frontiers in Earth Science. – 2023. – Vol. 11. Article 1330932.

18. Лобазнов, А. В. Разработка способа и средств обнаружения начальной стадии подземных пожаров : автореферат диссертации на

соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Лобазнов. – Москва, 2011. – 20 с.

19. Попов, М. Д. Расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловой депрессии в наклонных горных выработках : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. Д. Попов. – Пермь, 2024. – 157 с.

20. Chen, P. Human evacuation affected by smoke movement in mine fires / P. Chen, S. Guo, Y. Wang // International Journal of Coal Science & Technology. – 2016. – Vol. 3. – № 1. – P. 28-34.

21. Yuan, L. Characterization of a mine fire using atmospheric monitoring system sensor data / L. Yuan, R. A. Thomas, L. Zhou // Mining Engineering. – 2017. – Vol. 69. – № 6. – P. 57-62.

22. Zhang, M. Experiments on a Mine System Subjected to Ascensional Airflow Fire and Countermeasures for Mine Fire Control / M. Zhang, Z. Li // Fire. – 2024. – Vol. 7. – № 7. Article 223.

23. Optimizing fire emergency evacuation routes in underground coal mines: A lightweight network flow approach / S. Lotero, V. Androulakis, H. Khaniani [et al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2024. – Vol. 146. Article 105637.

24. Вяльцев, А. В. Разработка метода оценки риска возникновения пожаров и снижения пожарной опасности на угольных шахтах Восточного Донбасса : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Вяльцев. – Москва, 2010. – 121 с.

25. Litton, C. D. Evaluation of sensors for mine fire detection using an atmospheric monitoring system. / C. D. Litton, I. E. Perera // Mining Engineering. – 2015. – Vol. 67. – № 6. – P. 68-75.

26. Perera, I. E. Evaluation of smoke and gas sensor responses for fires of common mine combustibles / I. E. Perera, C. D. Litton // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. – 2014. – Vol. 336. – № 1. – P. 381-390.

27. Early fire detection for underground diesel fuel storage areas / L. Yuan, R. A. Thomas, J. H. Rowland, L. Zhou // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – Vol. 119. – P. 69-74.

28. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» / М. Д. Попов, Д. С. Кормщиков, М. А. Семин, Л. Ю. Левин // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 24-32.

29. Захаров, Е. А. Алгоритм расчёта устойчивости проветривания по фактору тепловой депрессии для больших вентиляционных сетей в АК «АЭРОСЕТЬ» / Е. А. Захаров, Д. С. Кормщиков, Н. А. Князев // Горное эхо. – 2024. – № 4. – С. 77-81.

30. Babrauskas, V. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard / V. Babrauskas, R. D. Peacock // Fire Safety Journal. – 1992. – Vol. 18. – № 3. – P. 255-272.

31. Underground mining fire hazards and the optimization of emergency evacuation strategies (EES): The issues, existing methodology and limitations, and way forward / O. B. Salami, G. Xu, A. R. Kumar, R. I. Pushparaj // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 177. – P. 617-634.

32. Popov, M. D. Air Distribution in Inclined Drifts with Intense Heat Emission Sources / M. D. Popov, M. A. Semin, L. Yu. Levin // Journal of Mining Science. – 2024. – Vol. 60. – № 4. – P. 658-668.

33. Effect of longitudinal ventilation on heat release rate of tunnel fires / L. Li, P. Mei, S. Li, H. Zhang // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2012. – Vol. 30. – P. 230-232.

34. Пересторонин, М. О. Исследование вопроса нормирования продолжительности горноспасательных работ в зоне высоких температур воздуха / М. О. Пересторонин, А. В. Зайцев, О. С. Паршаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – Т. 8. – С. 144-163.

35. Yuan, L. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires / L. Yuan, L. Zhou, A. C. Smith // Applied Thermal Engineering. – 2016. –

Vol. 100. – P. 1319-1326.

36. Salami, O. B. A CFD analysis of equipment fires in an underground development heading for improved auxiliary ventilation design / O. B. Salami, J. F. Brune, G. Xu // Safety in Extreme Environments. – 2025. – Vol. 7. – № 2. Article 6.

37. Mine Fire Behavior under Different Ventilation Conditions: Real-Scale Tests and CFD Modeling / F. Fernández-Alaiz, A. M. Castañón, F. Gómez-Fernández, M. Bascompta // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – № 10. Article 3380.

38. Enhancing fire safety in underground mines: Experimental and large eddy simulation of temperature attenuation, gas evolution, and bifurcation influence for improved emergency response / O. B. Salami, A. R. Kumar, I. Aamir [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 183. – P. 260-273.

39. Система жизнеобеспечения работников угольных шахт при локализации и ликвидации подземных пожаров, осложненных взрывами метановоздушной смеси / А. С. Голик, С. В. Новоселов, А. С. Ярош, В. Б. Попов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 49-53.

40. Рудничная атмосфера и вентиляция: Борьба с пылью, газами и пожарами: Горноспасательное дело. Т. 6 / ред. А. А. Скочинский. – Москва : Углетехиздат, 1957. – 375 с.

41. Ушаков, К. З. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело / К. З. Ушаков, Н. О. Каледина, Б. Ф. Кирин. – Москва : Горная книга (МГГУ), 2008. – 487 с.

42. Щукин, А. А. Особенности тушения пожаров в рудничных шахтах / А. А. Щукин, И. В. Багажков // Актуальные вопросы пожаротушения: Сборник материалов Всероссийского круглого стола. – Иваново : ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 161-165.

43. Твердые катреджы- пенообразователи для тушения подземных пожаров / М. М. Павлов, Н. Н. Чибинев, К. Н. Чибинев, А. И. Янц // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 2. – С. 82-85.

44. Овчаренко, Г. В. Перспективные направления способов изоляции подземных выработок при тушении пожаров на угольных шахтах / Г. В. Овчаренко, Л. В. Пихконен // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S7. – С. 373-381.

45. Портола, В. А. Перспектива применение азота для борьбы с пожарами и взрывами в шахтах / В. А. Портола // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 3 (54). – С. 57-59.

46. Study on Numerical Simulation of Fire Danger Area Division in Mine Roadway / H. Wen, Y. Liu, J. Guo [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1-13.

47. Expanding the FDS Simulation Capabilities to Fire Tunnel Scenarios Through a Novel Multi-scale Model / V. Verda, R. Borchiellini, S. Cosentino [et al.] // Fire Technology. – 2021. – Vol. 57. – № 5. – P. 2491-2514.

48. Снегирев, А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Техническая физика» / А. Ю. Снегирев. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехничекого университета, 2008. – 142 с.

49. Pope, S. B. Turbulent flows / S. B. Pope. – Cambridge; New York : Cambridge University Press, 2000. – 771 p.

50. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б. П. Казаков, Е. В. Колесов, Е. В. Накаряков, А. Г. Исаевич // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5-33.

51. Аксёнов, А. А. FlowVision: индустриальная вычислительная

гидродинамика / А. А. Аксёнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 5-20.

52. Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока / Д. В. Платонов, А. В. Минаков, А. А. Дектерев, А. В. Сентябов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5. – № 4. – С. 635-648.

53. Brodny, J. Determination of the Zone with a Particularly High Risk of Endogenous Fires in the Goaves of a Longwall with Caving / J. Brodny, M. Tutak // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 545-553.

54. Кобылкин, С. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ / С. С. Кобылкин, А. С. Кобылкин // Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 82-85.

55. Simulating and Predicting Escape Routes for Ventilation Network of Duong Huy Coal Company using Ventsim DESIGN Software / N. Duy Huy, N. Cao Khai, N. Van Thinh [et al.] // Inżynieria Mineralna. – 2022. – Vol. 50. – № 2. – P. 151-157.

56. Nematollahi Sarvestani, A. Fire Scenarios Inside a Room-and-Pillar Underground Quarry Using Numerical Modeling to Define Emergency Plans / A. Nematollahi Sarvestani, P. Oreste, S. Gennaro // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 7. Article 4607.

57. Федоткин, И. О. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию / И. О. Федоткин, Д. В. Федоткин // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 69-73.

58. CFD fire simulation using mixture fraction combustion and finite volume radiative heat transfer / J. E. Floyd, K. B. McGrattan, S. Hostikka, H. R. Baum // Journal of Fire Protection Engineering. – 2003. – Vol. 13. – № 1. – P. 11-36.

59. Computational fluid dynamics modelling of fire / K. McGrattan, R. McDermott, J. Floyd [et al.] // International Journal of Computational Fluid Dynamics. – 2012. – Vol. 26. – № 6-8. – P. 349-361.

60. Kallada Janardhan, R. Predictive Computational Fluid Dynamics Simulation of Fire Spread on Wood Cribs / R. Kallada Janardhan, S. Hostikka // Fire Technology. – 2019. – Vol. 55. – № 6. – P. 2245-2268.

61. Myilsamy, D. Numerical investigation of prediction performance of design fire curves for a tunnel fire / D. Myilsamy, C. B. Oh, C. Y. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2020. – Vol. 34. – № 9. – P. 3875-3887.

62. Numerical assessment of LES subgrid-scale turbulence models for expandable particles in fire suppression / I. M. De Cachinho Cordeiro, H. Liu, A. C. Y. Yuen [et al.] // Experimental and Computational Multiphase Flow. – 2023. – Vol. 5. – № 1. – P. 99-110.

63. Assessment of numerical simulation capabilities of the fire dynamics simulator (FDS 6) for planar air curtain flows / L. Yu, T. Beji, G. Maragkos [et al.] // FIRE TECHNOLOGY. – 2018. – Vol. 54. – № 3. – P. 583-612.

64. Modarres, M. Experimental and numerical fire behaviour analysis in Eucalyptus globulus trees / M. Modarres, M. Almeida, D. X. Viegas // International Journal of Wildland Fire. – 2024. – Vol. 33. – № 11. Article WF23131.

65. Rutqvist, J. Thermal management associated with geologic disposal of large spent nuclear fuel canisters in tunnels with thermally engineered backfill / J. Rutqvist // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – Vol. 102. Article 103454.

66. Analysis of heat loss mechanisms for mobile tent-type refuge alternatives / P. T. Bissert, D. S. Yantek, M. D. Klein, L. Yan // Transactions. – 2016. – Vol. 340. – № 1. – P. 70-74.

67. Chen, F. Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires / F. Chen, J. C. Leong // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – Vol. 35. – № 9. – P. 4554-4566.

68. Toward grid-independent modeling of natural convection with fire dynamics simulator / P. Dehghani, D. M. Chaudhari, M. J. DiDomizio, J. E. Floyd // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 250. Article

127190.

69. The maximum gas temperature rises beneath the ceiling in a longitudinal ventilated tunnel fire / Y. Yao, K. He, M. Peng [et al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – Vol. 108. – P. 103672.

70. Estimating the longitudinal maximum gas temperature attenuation of ceiling jet flows generated by strong fire plumes in an urban utility tunnel / K. Ye, X. Zhou, Y. Zheng [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 142. – P. 434-448.

71. Experimental study and modelling on critical velocity, smoke temperature distribution and driving force in uphill tunnel fire with longitudinal ventilation / P. Li, L. Shang, D. Yang, W. Zhang // Fire Safety Journal. – 2026. – Vol. 160. Article 104604.

72. Validation of the Froude model applicability for flame and thermal properties of tunnel fires with different cross-section scale ratios / W. Yan, C. Li, P. Zhao, Z. Gao // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 164. Article 108916.

73. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / eds. M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, [et al.]. – 5th ed. – New York, NY : Springer New York, 2016. – 3493 p.

74. Hwang, C. C. The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation / C. C. Hwang, J. C. Edwards // Fire Safety Journal. – 2005. – Vol. 40. – № 3. – P. 213-244.

75. Ingason, H. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation / H. Ingason, Y. Z. Li // Fire Safety Journal. – 2010. – Vol. 45. – № 6. – P. 371-384.

76. A study on longitudinal distribution of temperature rise and carbon monoxide concentration in tunnel fires with one opening portal / L. Li, D. Zhu, Z. Gao [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 28. Article 101535.

77. Wu, Y. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal

ventilation systems – a study of the critical velocity / Y. Wu, M. Z. A. Bakar // Fire Safety Journal. – 2000. – Vol. 35. – № 4. – P. 363-390.

78. Oka, Y. Control of smoke flow in tunnel fires / Y. Oka, G. T. Atkinson // Fire Safety Journal. – 1995. – Vol. 25. – № 4. – P. 305-322.

79. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation / W. K. Chow, Y. Gao, J. H. Zhao [et al.] // Fire Safety Journal. – 2015. – Vol. 75. – P. 14-22.

80. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel / L. Yuan, R. J. Mainiero, J. H. Rowland [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2014. – Vol. 30. – P. 55-62.

81. Estimation of higher heating value of coal based on proximate analysis using support vector regression / P. Tan, C. Zhang, J. Xia [et al.] // Fuel Processing Technology. – 2015. – Vol. 138. – P. 298-304.

82. Совершенствование технологических схем отработки склонных к самовозгоранию пластов угля, опасных по горным ударам / А. А. Сидоренко, П. Н. Дмитриев, В. Ю. Алексеев, С. А. Сидоренко // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 949-961.

83. Petrov, A. Mathematical Method of Rational Placement of Gas Fire Sensors / A. Petrov // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 20. Article 8349.

84. Федоткин, И. О. Моделирование влияния угла наклона выработки на распространение и стратификацию продуктов горения при пожаре в угольной шахте / И. О. Федоткин, О. В. Скопинцева, С. В. Баловцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 169-180.

85. Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow / L. H. Hu, F. Tang, D. Yang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – № 13. – P. 2844-2855.

86. Experimental and Theoretical Investigation of Longitudinal Temperature Attenuation and Smoke Movement in Urban Utility Tunnel Fires /

B. Cao, H. Liu, R. Fan [et al.] // Fire. – 2024. – Vol. 7. – № 4. Article 123.

87. Experimental and theoretical study on ceiling temperature distributions in mountain tunnel with a lateral open shaft / Y. Zhang, X. Liu, R. Tan [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – № 1. Article 280.

88. Hazard analysis of flue gases generate by coal mining conveyor belt fires / F. Kang, T. Zhang, J. Deng [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2025. – Vol. 150. – № 11. – P. 8559-8571.

89. Малашкина, В. А. Анализ факторов, определяющих возгорание на шахтных ленточных конвейерах на ранней стадии / В. А. Малашкина, С. С. Перекатов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 11. – С. 184-189.

90. Rowland, J. H. Flammability of wider conveyor belts using large-scale fire tests / J. H. Rowland, A. C. Smith // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. – 2011. – Т. 330. – № 1. – С. 345-349.

91. Mine conveyor belt fire classification / M. J. Barros-Daza, K. D. Luxbacher, B. Y. Lattimer, J. L. Hodges // Journal of Fire Sciences. – 2022. – Vol. 40. – № 1. – P. 44-69.

92. Study on Combustion Characteristics of Cable Based on Cone Calorimeter / H. Zhang, J. Yao, H. Zhu, X. Wang // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 5. article 1904.

93. Study on the fire risk of mining cables tested by cone calorimetry / W. Wang, H. Yi, Y. Huo [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2024. – Vol. 149. – № 12. – P. 6573-6583.

94. Study of the Fire Behavior of Multilayer Cables in a Mine Tunnel / Z. Tang, K. Gao, Y. Shan [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 6. Article 2059.

95. Tsatsoulas, D. Thermal behaviour and toxic emissions of various timbers in cone calorimeter tests / D. Tsatsoulas, H. N. Phylaktou, G. Andrews // Disaster Management and Human Health Risk. – New Forest, UK, 2009. – С. 181-194.

96. Burning process and fire characteristics of transformer oil: A study focusing on the effects of oil type / B. Zhang, J. Zhang, Y. Huang [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Vol. 139. – № 3. – P. 1839-1848.

97. El-Harbawi, M. Fire and Explosion Risks and Consequences in Electrical Substations—A Transformer Case Study / M. El-Harbawi // ASME Open Journal of Engineering. – 2022. – Vol. 1. Article 014501.

98. Hansen, R. Design of fire scenarios for Australian underground hard rock mines – Applying data from full-scale fire experiments / R. Hansen // Journal of Sustainable Mining. – 2019. – Vol. 18. – № 4. – P. 163-173.

99. Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions / P. Ayala, A. Cantizano, G. Rein [et al.] // Fire Technology. – 2016. – Vol. 52. – № 1. – P. 51-78.

100. Beyer, M. A Mixed Convection Model for Estimating the Critical Velocity to Prevent Smoke Backlayering in Tunnels / M. Beyer, C. Stacey, G. Brenn // Fire Technology. – 2025. – Vol. 61. – № 2. – P. 295-342.

101. Hansen, R. The Flame Characteristics of a Tyre Fire on a Mining Vehicle / R. Hansen // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022. – Vol. 39. – № 2. – P. 317-334.

102. Hansen, R. Design fires in underground mines : research report / R. Hansen. – Västerås : Mälardalen University, 2010. – 67 p. – (Studies in Sustainable Technology ; 2010:02).

103. Hansen, R. Heat release rate measurements of burning mining vehicles in an underground mine / R. Hansen, H. Ingason // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 61. – P. 12-25.

104. Портола, В. А. Оценка мер по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах / В. А. Портола, А. Е. Овчинников, А. Н. Жданов // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 12. – С. 205-214.

105. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт / В. А. Портола, А. Е. Овчинников, С. А. Син, В. Г. Игишев // Вестник

научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 36-42.

106. Study on Spontaneous Combustion Characteristics and Early Warning of Coal in a Deep Mine / C. Wang, Y. Du, Y. Deng [et al.] // Fire. – 2023. – Vol. 6. – № 10. Article 396.

107. Wang, H. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling / H. Wang, B. Z. Dlugogorski, E. M. Kennedy // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – № 6. – P. 487-513.

108. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса / В. А. Портола, Н. Л. Галсанов, М. В. Шевченко, Н. Ю. Луговцова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (90). – С. 44-47.

109. Chen, X. The Influence of the Fire Point on the Thermal Dynamic Disaster in the Goaf / X. Chen, C. Song, Z. Zhang // Fire. – 2024. – Vol. 7. – № 8. Article 270.

110. Mowrer, F. W. Methods to characterize heat release rate data / F. W. Mowrer, R. B. Williamson // Fire Safety Journal. – 1990. – Vol. 16. – № 5. – P. 367-387.

111. Ingason, H. Design fire curves in tunnels / H. Ingason // Fire safety journal. – 2009. – Vol. 44. – № 2. – P. 259-265.

112. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J. G. Quintiere. – Boca Raton : CRC Press, 2022. – 384 с.

113. Hansen, R. Varying Heat Release Rates per Unit Area – The Impact in Underground Mines / R. Hansen // Mining Revue. – 2023. – Vol. 29. – № 4. – P. 1-28.

114. Hansen, R. Design Fire Scenarios Involving Non-Fire Resistant Conveyor Belts–Numerical Study / R. Hansen // International Journal of Mining, Materials, and Metallurgical Engineering (IJMMME). – 2021. – Vol. 7. – № 1. – P. 1-15.

115. Green, A. R. A Numerical Study of Smoke Movement along an

Inclined Coal Conveyor / A. R. Green, D. F. Fletcher // Fire Safety Science - Proceedings of the 5th International Symposium. – 1997. – P. 1237-1248.

116. Dubey, S. R. Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark / S. R. Dubey, S. K. Singh, B. B. Chaudhuri // Neurocomputing. – 2022. – Vol. 503. – P. 92-108.

117. Glorot, X. Deep sparse rectifier neural networks / X. Glorot, A. Bordes, Y. Bengio // Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics. – JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2011. – P. 315-323.

118. Kapoor, S. Leakage and the reproducibility crisis in machine-learning-based science / S. Kapoor, A. Narayanan // Patterns. – 2023. – Vol. 4. – № 9. Article 100804.

119. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library / A. Paszke, S. Gross, F. Massa [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems / eds. H. Wallach [et al.]. – Curran Associates, Inc., 2019. – Vol. 32.

120. Федоткин, И. О. Оперативная оценка параметров пожара в горной выработке угольной шахты с использованием машинного обучения / И. О. Федоткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 157-166.

121. Федоткин, И. О. Влияние измерительной конфигурации на точность оперативной оценки параметров пожара в горной выработке / И. О. Федоткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 152-161.

122. Li, Y. Z. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires / Y. Z. Li, B. Lei, H. Ingason // Fire Safety Journal. – 2010. – Vol. 45. – № 6-8. – P. 361-370.

123. Experimental study of back-layering length and critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fire with various rectangular cross-sections / T. Zhang, G. Wang, J. Li [et al.] // Fire Safety Journal. – 2021. – Vol. 126. Article

103483.

124. Smoke dispersion test and emergency control plan of fire in mine roadway during downward ventilation / D. Hu, Z. Li, H. Wang [et al.] // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – № 1. Article 3683.

125. Levin, L. Experimental determination of the ventilation pressure thermal drop effect on the air flows in the inclined mine workings / L. Levin, E. Kuzminykh, S. Zhikharev // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 11. Article 1600083.

126. Руденко, В. А. Тактика ведения горноспасательных работ членами ВГК в условиях ограниченной численности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Руденко. – Москва, 2025. – 127 с.

127. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы», утвержденные приказом Ростехнадзора от 11.12.2020 № 520 (ред. от 20.02.2026).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АССОЦИАЦИЯ
«НАУЧНОЕ ОБЩЕСТВО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ»
(НОПБ)

143903, Московская область, г.Балашиха, мкр. ВНИИПО, д.12
E-mail: np.nanpb@mail.ru; http://www.nanpb.ru; телефон: (495) 521-25-22.

02.06.2026 № _____
на № _____ от _____

АКТ
использования результатов исследований диссертационной работы Федоткина И.О.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Федоткина Илии Олеговича «Разработка метода оперативной оценки и прогнозирования опасных факторов пожара в горных выработках с применением машинного обучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность», использованы в научно-исследовательских работах, выполняемых Ассоциацией в части разработки подходов к оперативному прогнозированию опасных факторов пожара, обоснования рационального размещения точек измерения температуры и концентрации оксида углерода, а также формирования многопараметрических расчетных сценариев численного моделирования пожаров с применением программного комплекса FDS.

Главный ученый секретарь Е. Ю. Сушкина

ОГРН 1037717008702 ИНН 7717141209
АССОЦИАЦИЯ «НАУЧНОЕ ОБЩЕСТВО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ»
МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ, г. БАЛАШИХА

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Специальные Проекты и Системы»
142784, г. Москва, п. Московский,
д. Румянцево, строение 1, Бизнес-Парк «Румянцево»,
подъезд 5, этаж 4.
телефон (495) 240-53-20, факс (495) 240-53-30

ОКПО 84318983, ОГРН 1075003009620
ИНН/КПП 5003071048/775101001

07.09.2026 № _____

АКТ

Об использовании результатов исследований диссертационной работы Федоткина Илии Олеговича на тему: «Разработка метода оперативной оценки и прогнозирования опасных факторов пожара в горных выработках с применением машинного обучения» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанный в диссертации Федоткиным И.О. метод оперативной оценки и прогнозирования параметров пожара на базе модели машинного обучения, использован при расчетах развития опасных факторов пожара объекта в горной выработке.

На проектируемые организацией объекты в горных выработках не распространяются методики по расчету пожарного риска, в связи с этим проводятся расчеты ОФП и времени эвакуации. По результатам моделирования обосновывается выбор активных и пассивных систем противопожарной защиты при проектировании, направления эвакуации персонала.

Результаты диссертации «Разработка метода оперативной оценки и прогнозирования опасных факторов пожара в горных выработках с применением машинного обучения» позволяют закладывать в расчеты необходимые исходные данные и определять рациональные конфигурации точек измерения параметров пожарной обстановки в горной выработке, в том числе наклонной.

Генеральный директор М.П. Клюшин А.А.