

Научная статья  
УДК 336.132.1  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.50.001

## Моделирование тушения пожаров в шахтах водной средой в метастабильном фазовом состоянии с водорастворимыми ингибиторами

*Ринат Валерьевич Халиков*<sup>1</sup>  
*Борис Борисович Гринченко*<sup>2</sup>  
*Юлия Николаевна Коваль*<sup>3</sup>  
*Николай Викторович Мартинович*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия

<sup>3,4</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0842-4989>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1759-2308>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-5482-6439>

**Автор, ответственный за переписку:** Юлия Николаевна Коваль, [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

**Аннотация.** Исследование посвящено разработке инновационного способа локализации эндогенных пожаров и предотвращения взрывов в угольных шахтах. Предложено применение водной среды в метастабильном фазовом состоянии с комплексным ингибитором на основе сульфата аммония и хлорида магния. Актуальность работы обусловлена высокой частотой аварий, связанных с взрывами метана и угольной пыли, что подтверждается анализом статистических данных за 2005-2024 гг. Методом математического моделирования в FDS была реконструирована авария на шахте «Ульяновская». Установлено, что причиной катастрофы 2007 года стало воспламенение угольной пыли, инициированное метановоздушной смесью. Моделирование показало, что состав с массовой концентрацией 3,4% обеспечивает флегматизацию среды за 10 секунд, поглощение метана и седиментацию угольной пыли, предотвращая достижение взрывоопасных концентраций. Определены оптимальные параметры подачи огнетушащего состава - размещение устройств на высоте 1,5-2 м на боковых поверхностях выработок. Показана перспективность внедрения разработанного метода для повышения промышленной безопасности на угледобывающих предприятиях. Эффективность подтверждена численным экспериментом и сопоставлением с реальными данными. Результаты работы могут быть использованы при создании систем объемного пожаротушения и взрывоподавления в горной промышленности.

**Ключевые слова:** эндогенные пожары, угольные шахты, взрывобезопасность, комплексные ингибиторы, метастабильная фазовая среда, математическое моделирование, сульфат аммония, хлорид магния, флегматизация

**Для цитирования:** Халиков Р.В., Гринченко Б.Б., Коваль Ю.Н., Мартинович Н.В. Моделирование тушения пожаров в шахтах водной средой в метастабильном фазовом состоянии с водорастворимыми ингибиторами // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 279-290. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.50.001>.

Original article.

## Simulation of fire extinguishing in mines by an aqueous medium in a metastable phase state with water-soluble inhibitors

*Rinat V. Khalikov*<sup>1</sup>

*Boris B. Grinhenko*<sup>2</sup>

*Julia N. Koval*<sup>3</sup>

*Nikolay V. Martinovich*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russia

<sup>3,4</sup>Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0842-4989>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1759-2308>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-5482-6439>

**Corresponding author:** Yulia Nikolaevna Koval, [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

**Abstract.** The research is devoted to the development of an innovative way to localize endogenous fires and prevent explosions in coal mines. The use of an aqueous medium in a metastable phase state with a complex inhibitor based on ammonium sulfate and magnesium chloride is proposed. The relevance of the work is due to the high frequency of accidents associated with methane and coal dust explosions, which is confirmed by the analysis of statistical data for 2005-2024. The accident at the Ulyanovsk mine was reconstructed using mathematical modeling in FDS. It was established that the cause of the disaster in 2007 was the ignition of coal dust, initiated by a methane-air mixture. The simulation showed that the composition with a mass concentration of 3.4% ensures phlegmatization of the medium in 10 seconds, absorption of methane and sedimentation of coal dust, preventing the achievement of explosive concentrations. The optimal parameters for the supply of fire extinguishing agent have been determined - the placement of devices at a height of 1.5-2 m on the side surfaces of the workings. The prospects of implementing the developed method to improve industrial safety at coal mining enterprises are shown. The effectiveness has been confirmed by numerical experiment and comparison with real data. The results of the work can be used to create volumetric fire extinguishing and explosion suppression systems in the mining industry.

**Keywords:** endogenous fires, coal mines, explosion protection, complex inhibitors, metastable phase environment, mathematical modeling, ammonium sulfate, magnesium chloride, phlegmatization

**For citation:** Khalikov R.V., Grinchenko B.B., Koval Yu.N., Martinovich N.V. Simulation of fire extinguishing in mines by an aqueous medium in a metastable phase state with water-soluble inhibitors // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 279-290. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.57.50.001>.

### Введение

Одним из приоритетных направлений государственной политики является поддержка исследований в области использования возобновляемых источников энергии для энерго- и теплоснабжения [1]. Однако по данным на 2024 год их доля в отечественной энергетике составляет около 12,5% [1], поэтому использование невозобновляемых ресурсов остается необходимым. Добыча невозобновляемых источников энергии, таких как уголь, связана с повышенной пожаровзрывоопасностью [2, 3]. По данным на 2024 год в составе угольной промышленности функционирует 52 шахты, 127 разрезов [4]. Постоянное пребывание персонала (до 200 человек) на глубинах до 2056 [4-5] м в условиях ведения горных работ сопряжено с повышенными рисками, обусловленными совокупностью геотехнологических, газодинамических и техногенных факторов. Такие условия создают потенциальную угрозу возникновения аварийных ситуаций, которые в случае реализации могут привести не только к человеческим жертвам, но и к значительному экономическому ущербу, включая повреждение

инфраструктуры, остановку производственного цикла и экологические последствия (Табл.1) [5].

Тушение пожаров на территории горнодобывающих предприятий представляет собой чрезвычайно сложную задачу для подразделений пожарной охраны и военизированных горноспасательных частей. Это обусловлено рядом факторов: значительной глубиной залегания очагов возгорания — до 240 м и более, разветвлённой и многоконтурной системой горных выработок, ограниченной возможностью визуального контроля, а также специфическими микроклиматическими и газодинамическими условиями подземного пространства. Такие особенности затрудняют как оперативное обнаружение пожара, так и доставку огнетушащих веществ к очагу, что существенно увеличивает время ликвидации горения.

Ключевыми проблемами являются ограниченный доступ к очагу возгорания, высокая температура и задымленность, риск обрушения пород, а также постоянная угроза взрыва скоплений метана или угольной пыли [2, 5, 7]. Время локализации данных пожаров может достигать до нескольких дней, что влечёт за собой не только существенные экономические проблемы, но и экологические последствия [6-8].

Экономический ущерб от подземных пожаров складывается не только из прямых потерь от уничтожения дорогостоящего оборудования и приостановки добычи, но и из затрат на проведение масштабных аварийно-спасательных и ликвидационных работ, которые требуют привлечения значительных человеческих и материальных ресурсов [5, 8]. Экологические последствия носят долгосрочный характер: продукты горения, включая токсичные газы (CO, SO<sub>2</sub>, оксиды азота) и канцерогенные вещества, проникают через трещины и породы в атмосферу, загрязняют грунтовые воды, что приводит к деградации прилегающих экосистем [6, 7]. Кроме того, подземные (скрытые) пожары, в особенности в торфяных или угольных массивах, способны тлеть в течение месяцев и даже лет, питаясь за счёт внутреннего кислородного обмена и низкотемпературного окисления горючих материалов. Такие пожары создают устойчивый и трудноконтролируемый источник опасности, сопровождающийся выделением токсичных газов, просадками грунта и повторным возгоранием на поверхности. В таких условиях проведение рекультивационных мероприятий становится невозможным, поскольку почвенно-растительный покров не может восстанавливаться в зоне постоянного термического и химического воздействия.

В связи с этим, особую актуальность приобретают превентивные меры и разработка новых технологий ликвидации чрезвычайных ситуаций в шахтах. К ним относятся совершенствование систем мониторинга метано-воздушной среды и пылеподавления, внедрение автоматизированных систем пожаротушения в ключевых выработках, а также использование современных методов, таких как барражирование очагов пожара инертными газами или пенными составами для изоляции от доступа кислорода [2, 3, 8]. Инвестиции в эти направления не только повышают уровень промышленной безопасности, но и способствуют минимизации долгосрочных экономических и экологических издержек, что является стратегически важной задачей в условиях сохранения значительной доли угольной генерации в энергобалансе страны.

**Табл.1. Статистические данные по авариям на шахтах 2005 – 2024 гг.**

Годы	Всего аварий	Пожары	Взрывы	Внезапные выбросы, горные удары	Обрушения	Прочие аварии	Погибшие
2005	81	35	6	2	18	20	30
2006	75	32	5	1	20	17	25
2007	83	32	9	0	20	22	149
2008	49	29	2	0	9	9	17
2009	50	14	5	1	18	12	9
2010	52	26	5	0	13	8	101

Годы	Всего аварий	Пожары	Взрывы	Внезапные выбросы, горные удары	Обрушения	Прочие аварии	Погибшие
2011	38	20	3	2	8	5	4
2012	29	15	4	1	4	5	7
2013	37	21	3	0	9	4	27
2014	28	17	4	0	4	3	10
2015	27	18	1	0	6	2	4
2016	20	12	1	0	4	3	36
2017	34	17	1	1	7	8	8
2018	5	2	0	1	1	1	4
2019	17	1	1	9	3	3	2
2020	7	1	0	2	3	1	3
2021	14	7	2	3	2	0	7
2022	20	7	2	3	2	6	5
2023	5	4	0	1	0	0	7
2024	5	2	1	1	1	0	5

Проанализируем 8 столбец Табл.1, заметим, в 2007 и 2010 число погибших значительно превышает соответствующие значения других годов. Это связано с тем в 2007 году при аварии шахте «Ульяновская» погибло 110 человек, а в 2010 году при аварии на шахте «Распадская» - 91 [5]. На основе Табл.1 построим распределение количества аварий и значения коэффициента корреляции без автокорреляции количества погибших от вида аварии, используя математический аппарат корреляции Пирсона (Рис.1).

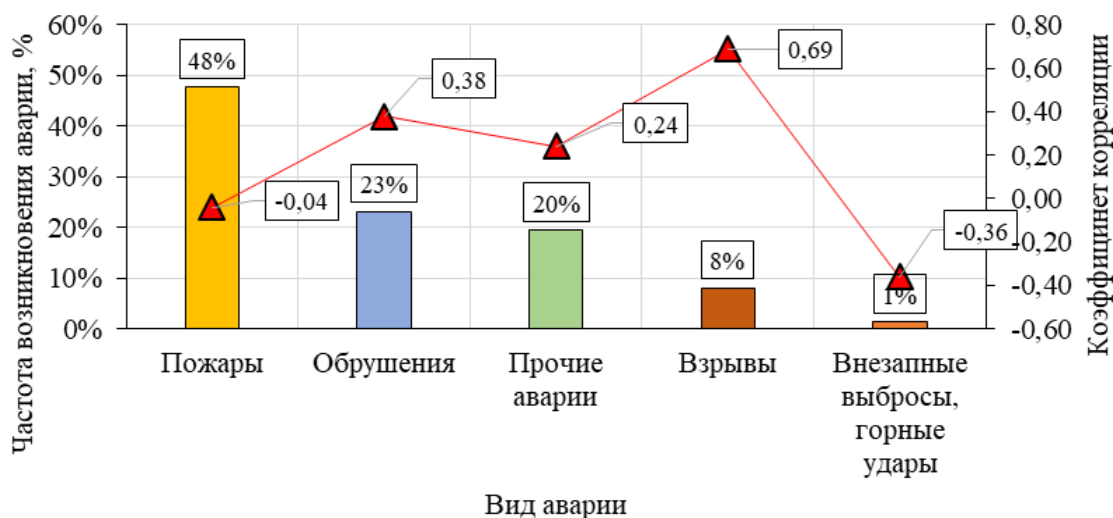


Рис.1. Гистограмма зависимости частоты возникновения аварий и числа погибших на шахте от ее вида

В результате проведенного анализа данных, представленных на Рис.1, установлено, что в период с 2005 по 2017 год доминирующими видами аварийных ситуаций в угольных шахтах являлись пожары, обрушения горных пород и прочие инциденты, совокупная доля которых превышала 80% от общего количества зарегистрированных аварий. При этом максимальное значение коэффициента корреляции Пирсона ( $r_{xy} = 0,69$ ,  $p < 0,05$ ) было выявлено во взаимосвязи между показателями "Взрывы-погибшие", что свидетельствует о наличии статистически значимой прямой зависимости высокой степени.

Полученные данные позволяют выдвинуть гипотезу о недостаточной эффективности существующих систем предотвращения взрывов метана и угольной пыли в подземных выработках, что в значительной степени детерминирует повышенный уровень смертности

среди шахтеров. Следует отметить, что для параметрической пары "Обрушения-погибшие" также зафиксирована положительная корреляционная связь средней силы ( $r_{xy} = 0,38$ ).

Анализ последствий аварийных ситуаций позволяет констатировать, что как при обрушениях, так и при взрывах пострадавшие оказываются блокированными в подземных пространствах. Взрывы метано-воздушной смеси могут инициировать развитие вторичных эндогенных пожаров, сопровождающихся интенсивным выгоранием углеродосодержащих пород и самовоспламеняющихся материалов. Это приводит к резкому снижению концентрации кислорода в атмосфере горных выработок и образованию токсичных газовых смесей (включая угарный газ, и другие продукты неполного сгорания), создающих непосредственную угрозу жизни. В этих условиях применяемый способ пожаротушения в подземных горных выработках должен отвечать комплексу требований:

- обеспечивать эффективную ликвидацию эндогенного очага возгорания;
- подавлять процессы газовой выделенности и предотвращать формирование взрывоопасных концентраций метана;
- сохранять жизнеспособную газовую среду в маршрутах эвакуации;
- гарантировать безопасную эвакуацию людей и создавать условия для последующих горноспасательных работ.

В рамках текущей работы предлагается теоретически оценить возможность использования водной среды в метастабильном фазовом состоянии (далее – ВСМФС) при дозировании водорастворимых ингибиторов для подавления эндогенных пожаров в горных выработках. Для достижения цели исследования ВСМФС представляет из себя двухфазную систему из высокодисперсной водной среды с размером капель воды от 0,01 мкм до 100 мкм и паровой фазы [9-13, 21]. Преимущества применения ВСМФС над остальными огнетушащими составами описаны в работе [21]. Данная среда может находиться в воздухе до 30 минут не осаждаясь, обеспечивая эффективный теплоотвод из зоны горения и выступать средством осаждения продуктов сгорания и угольной пыли.

Водная фаза может быть использована в качестве средства транспортировки водорастворимых ингибиторов в зону эндогенного пожара, таких как гексацианоферрата калия (II), сульфата аммония и хлорида магния. На данный момент существуют экспериментально установленные факты, что данные составы обладают в отдельности ингибирующими свойствами.

Авторами сделано предположение, что в случае совместного применения данные ингибирующие вещества могут быть эффективнее для тушения пожаров и как следствие минимальная гасящая концентрация состава будет существенно ниже, что позволит более экономично расходовать имеющиеся запасы водорастворимых ингибиторов. Для оценки целесообразности применения на практике данных комплексных составов в рамках текущей работы предлагается рассмотреть возможность применения комплексного ингибитора сульфата аммония и хлорида магния, так как эффективность совместного применения данных ингибиторов для тушения пожаров класса В была установлена авторами ранее [14]. Механизм действия комплексного ингибитора на основе сульфата аммония и хлорида магния включает эндотермическое разложение с поглощением тепла, ингибирование радикальных реакций в пламени за счёт образования пассивных радикалов, а также коагуляцию и осаждение угольной пыли за счёт изменения поверхностного заряда частиц.

Для оценки эффективности применения данного состава для локализации эндогенных пожаров в угольных шахтах в рамках текущей работы предлагается использовать среду математического моделирования FDS. Объектом исследования был выбран аварийный участок шахты Ульяновская событий 19 марта 2007 года.

Анализ публикаций [15-20] показал, что, взрыв на шахте «Ульяновская» в 2007 году, несмотря на официальную версию о воспламенении метана, демонстрирует критическую роль угольной пыли как основного фактора катастрофы. Данные аэрогазового контроля показали

отсутствие взрывоопасных концентраций метана (менее 1.6%  $\text{CH}_4$ ), в то время как направление ударной волны и разрушение перемычек указали на эпицентр в монтажной камере 50-15, где скопилась угольная пыль из-за нарушений вентиляции. Ошибки в управлении проветриванием (неэффективное включение резервного вентилятора) и отсутствие мониторинга пыли в реальном времени подчеркивают системные недостатки безопасности. Этот случай подтверждает, что угольная пыль, особенно в сочетании с метаном даже в низких концентрациях, требует не менее строгого контроля, чем газ.

Авария актуализирует необходимость внедрения комплексных ингибиторов для подавления эндогенных пожаров и взрывов пыли. Моделирование ситуации с использованием комплексного ингибитора сульфата аммония и хлорида магния должно оценить их влияние на: снижение взрывоопасности пылевых скоплений за счет пассивации частиц, стабилизацию температуры в выработанных пространствах, минимизацию последствий ошибок проветривания. Интеграция ингибиторов в системы безопасности шахт могла бы прервать цепь событий, ведущих к катастрофе, и компенсировать человеческий фактор, что особенно актуально для условий Кузбасса с его высокой горно-геологической динамикой.

### Обоснование этапов и методов моделирования

Этапы моделирования аварии участка шахты Ульяновская событий 19 марта 2007 года разграничены авторами публикации на два блока:

- моделирование возникновения аварии на основе данных газоанализаторов и учета следующих технических особенностей: угол падения пласта:  $30^\circ$ , определяющий гравитационное перемещение газа и пыли, глубина разработки:  $\sim 300$  м, влияющая на горное давление и газодинамические процессы), интенсивность метановыделения:  $10-15 \text{ м}^3/\text{т}$  (с учетом примыкания к Усковской синклинали), центрально-фланговая схема проветривания (Рис.2-4). Для моделирования были приняты следующие параметры: размер ячейки сетки: 0,1 м, граничные условия – Дирихле, модель турбулентности – LES, модель горения – EDC. Для регистрации концентрации газов в рамках моделирования применялись газоанализаторы Testo 350, а концентрация угольной пыли использовались датчики пыли ДП-3. Принятые допущения: однородность распределения пыли, стационарность выделения метана. Погрешности могут быть связаны с не учётом турбулентности и реальной дисперсности пыли.

- моделирование данной аварии при условии применения комплексных ингибиторов (Рис.5) при этом на график также нанесем нижний концентрационный угольной пыли, который может снижаться до 3,61% (масс.) при наличии 1% (объемн.) концентрации метана [22]. Дополнительно обозначим верхний концентрационный предел угольной пыли 71,43% (масс.).

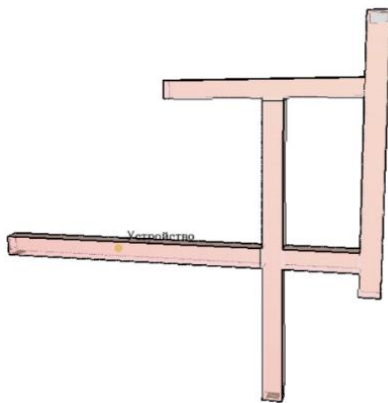


Рис.2. Общий вид, моделируемого ствола шахты

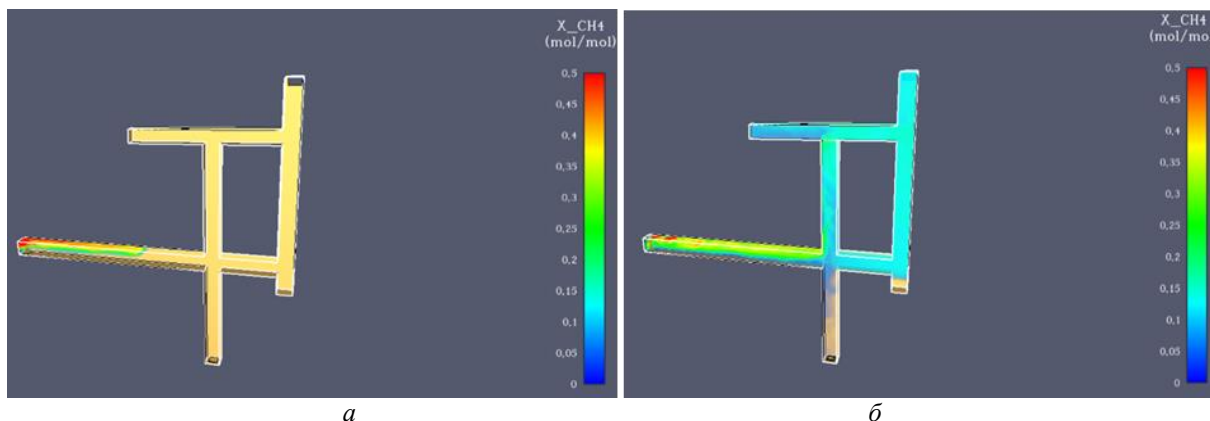


Рис.3. Распространение метана: а – перед аварией; б – через 300 с после включения вентиляции

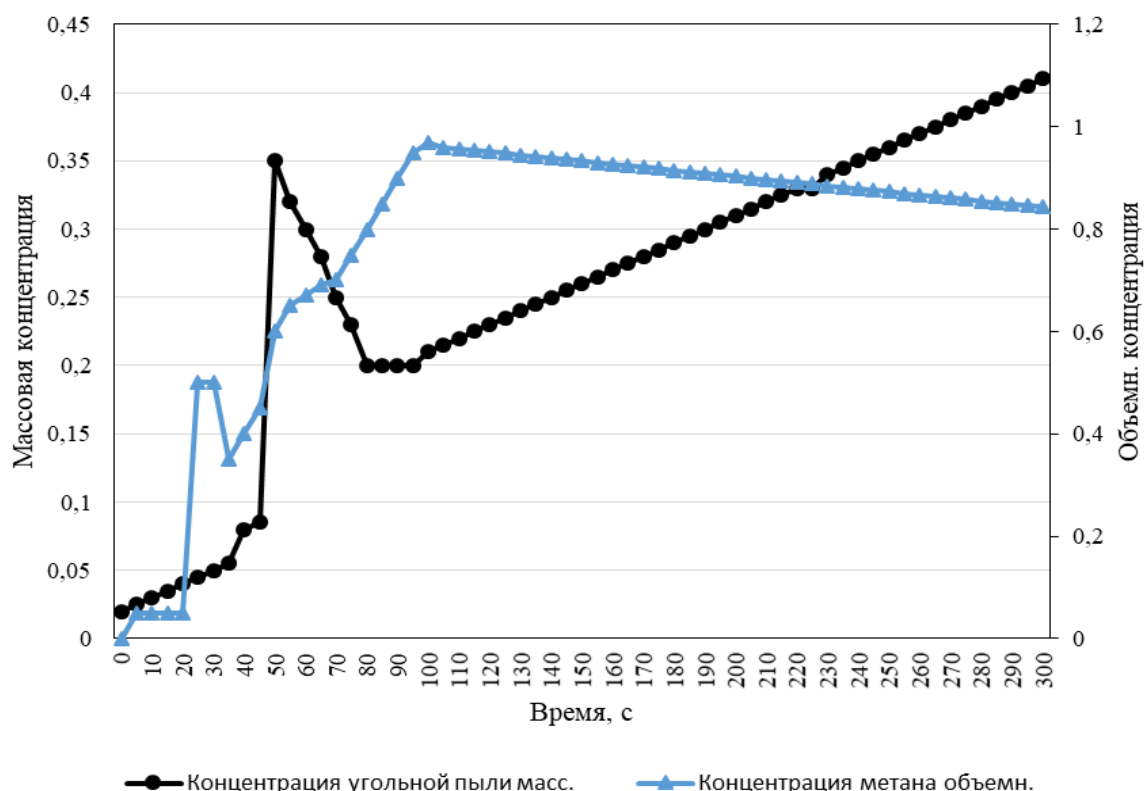


Рис.4. Данные по концентрациям: метана (объёмн.), угольной пыли (масс.)

### Результаты и обсуждение

Анализ Рис.3, 4 показывает, что накопление метано-воздушной смеси в горизонтальной части шахты создавало стехиометрическую концентрацию в потолочной зоне. Взрыва не произошло из-за отсутствия источника воспламенения. После включения системы вентиляции концентрация метана в атмосфере горной выработки снизилась ниже нижнего концентрационного предела воспламеняемости НКПВ (Рис.4), что исключило возможность образования взрывоопасной метано-воздушной смеси. Однако серия взрывов, произошедшая через 10 с, вероятно, была вызвана взрывом угольной пыли. Как видно из Рис.4, при достижении 1% концентрации метана (до 15 с) нижний концентрационный предел воспламенения пыли снижается до 3,61%, что совпадает с ее фактической концентрацией (Рис.4). Таким образом, причиной катастрофы стал взрыв пылевоздушной смеси, инициированный метаном. Модель подтверждает свою достоверность, так как на 60 с концентрация пыли превышает верхний предел (71,43%), исключая дальнейшие взрывы.

Для предотвращения подобных сценариев была смоделирована подача ВСМФС с комплексным ингибитором (3,4%) параллельно горизонтальным выработкам (Рис.5). Данная концентрация, установленная ранее, обеспечивает максимальный флегматизирующий эффект. Размещение устройств подачи на высоте 1,5–2 м на боковых поверхностях обеспечивало равномерное распределение состава, в отличие от других схем, ведущих к неравномерности.

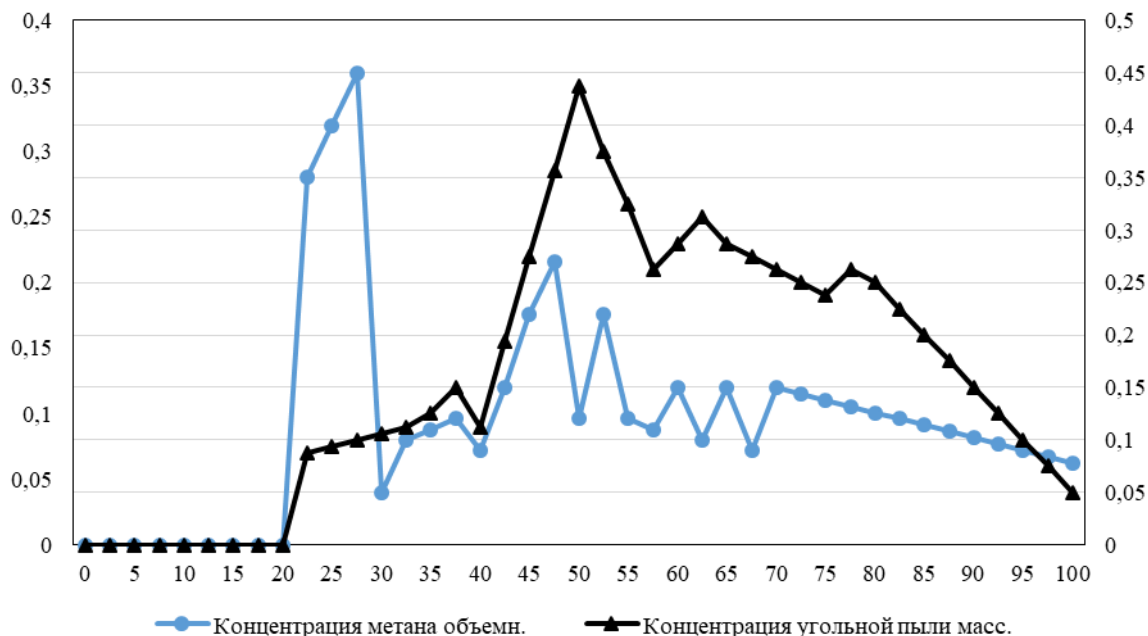


Рис.5. Данные по концентрации метана (объемн.) и угольной пыли (массовая) при подаче комплексного ингибитора

Моделирование подтвердило, что подача ВСМФС с комплексным ингибитором (3,4%) обеспечивает поглощение метана и осаждение угольной пыли, предотвращая достижение взрывоопасных концентраций. Флегматизирующий эффект достигается за 10 секунд. Исследование «demonstrates» высокую эффективность предложенного метода с использованием ВСМФС, модифицированной ингибитором, для подавления опасных факторов в угольных шахтах, что подтверждено моделированием в FDS.

### Заключение

1. Установлена причина катастрофы: Моделирование подтвердило, что наиболее вероятной причиной серии взрывов на шахте «Ульяновская» (2007 г.) стало воспламенение угольной пыли, инициированное метановоздушной смесью с концентрацией около 1%, что значительно снизило нижний концентрационный предел воспламенения пыли.

2. Доказана эффективность комплексного ингибитора. Показано, что применение ВСМФС с массовой концентрацией ингибитора 3,4% позволяет достичь флегматизирующего эффекта в замкнутом объеме горной выработки и существенно снизить взрывоопасность среды.

3. Определены оптимальные параметры подачи, математическим моделированием установлены рациональные способы и места размещения устройств подачи (на боковых поверхностях), а также время достижения флегматизирующей концентрации (в течение 10 секунд).

4. Подтверждена адекватность созданной модели аварийного участка шахты Ульяновская 19 марта 2007 года высокой сходимостью теоретически полученных результатов с фактическими данными по аварии.

5. Практическая значимость работы заключается в перспективах разработки научно-обоснованных рекомендаций по внедрению систем объемного пожаротушения

и взрывоподавления на основе ВСМФС с комплексными ингибиторами на объектах угольной промышленности. Это позволит значительно повысить уровень промышленной безопасности, минимизировать человеческие жертвы и экономический ущерб от аварий.

Перспективы дальнейших исследований видятся в проведении натурных экспериментов для верификации данных моделирования, оптимизации состава и концентрации комплексных ингибиторов, а также в разработке конкретных технических решений и регламентов по интеграции данной технологии в системы безопасности действующих шахт.

#### Список источников

1. Роль возобновляемых источников энергии и вторичных возобновляемых источников энергии в энергоменеджменте стран Европейского союза / А.А. Настенко, В.В. Филатов, А.Л. Золкин, О.А. Полянская // Микроэкономика. – 2024. – № 5. – С. 65-77. – DOI 10.33917/mic-5.118.2024.65-77. – EDN IXSSDW.
2. Мячин, В.В. Опасность появления пожарных газов на негазовых шахтах в аварийных условиях / В.В. Мячин, С.А. Шаров // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 2. – С. 34-35. – EDN JVGYXV.
3. Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности / В.А. Портола, О.В. Тайлаков, Ли Хи Ун [и др.] // Уголь. – 2021. – № 5(1142). – С. 47-52. – DOI 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52. – EDN JLPNSN.
4. Росстат. [Электронный ресурс]. URL: rosstat.gov.ru (дата обращения: 01.07.2025)
5. Balovtsev, S.V. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines / S.V. Balovtsev, O.V. Skopintseva, E.Yu. Kulikova // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2024. – No. 12. – P. 135-149. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_135. – EDN ZLPAPA.
6. Коптев, М.Ю. Определение степени участия угольной пыли во взрыве с учетом содержания инертной пыли в смеси при аварии на шахте / М.Ю. Коптев, М.С. Сазонов // Уголь. – 2025. – № 1(1189). – С. 58-63. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-1-58-63. – EDN AWWMKW.
7. Руденко, В.А. Оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт / В.А. Руденко // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 243-249. – DOI 10.17073/2500-0632-2024-03-234. – EDN FNEMDL.
8. Оптимизация состава растворов водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров / Р.В. Халиков, В.В. Роевко, И.Р. Бегишев, О.В. Двоенко // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 10. – С. 15-20. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-10-15-20. – EDN PGNYMI.
9. Халиков, Р.В. Моделирование процесса флегматизации метана температурно активированной водой в замкнутом объеме теплоэлектростанций / Р.В. Халиков, Т.Н. Халикова // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 1. – С. 37-43. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-1-37-43. – EDN TOUIYU.
10. Ищенко, А.Д. Эксперименты тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) водной средой объемным способом / А.Д. Ищенко, В.В. Роевко, И.Г. Малыгин // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1(41). – С. 128-134. – EDN YMNXPXN.
11. Касым, К.Ж. Способ ограничения распространения продуктов горения на открытых пространствах / К.Ж. Касым, А.Д. Ищенко, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 3. – С. 65-72. – DOI 10.25257/FE.2024.3.65-72. – EDN LROLNQ.
12. О вопросах верификации результатов моделирования теплового потока полевым методом / Р.В. Мироненко, М.В. Сибиряков, А.И. Соковнин, Р.К. Ибатулин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 30-43. – DOI 10.25257/FE.2023.1.30-43. – EDN ZWJWBH.
13. Халиков, Р.В. Исследование комплексных ингибирующих составов для объемного пожаротушения водными средами / Р. В. Халиков, А.Д. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2025. – Т. 34, № 2. – С. 60-68. – DOI 10.22227/0869-7493.2025.34.02.60-68. – EDN ENTGPY.

14. Бычков С.В., Герусов А.И. Десятилетие взрыва на шахте «Ульяновская». Анализ выводов государственной комиссии и горных специалистов // Вестник Научного центра. 2016. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/desyatiletie-vzryva-na-shahte-ulyanovskaya-analiz-vyvodov-gosudarstvennoy-komissii-i-gornyh-spetsialistov> (дата обращения: 26.08.2025).
15. Risk Assessment of Coal and Gas Outburst Accidents in Coal Mines Based on Factor Analysis and Logistic Regression / X. Li, Yu. Li, Z. Fa, E. Alam // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2022. – No. 10-1. – P. 116-127. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_101\_0\_116. – EDN WFRKKM.
16. Куприянов, В.В. Распознавание классов подземных аварий в угольных шахтах на основе нейросетевой технологии / В.В. Куприянов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 8. – С. 148-157. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_148. – EDN VIHIGI.
17. 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. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245. – EDN WAIFPS.
18. Баловцев, С.В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах / С.В. Баловцев // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8, № 4. – С. 350-359. – DOI 10.17073/2500-0632-2023-10-163. – EDN WBQXEQ.
19. Сравнительный анализ детонационного и дефлаграционного типов взрывного превращения на примере реальных аварийных ситуаций / А.А. Комаров, В.В. Тимохин, А.П. Шевченко, Р.Р. Шангараев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 4. – С. 64-71. – DOI 10.25257/FE.2024.4.64-71. – EDN CCWOGK.
20. Роенко, В.В. Технология температурно-активированной воды: физическая сущность, история разработки, перспективы развития / В.В. Роенко, А.П. Кармес // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 3. – С. 15-20. – DOI 10.25257/FE.2017.3.15-20. – EDN ZITMYL.
21. Бунев В.А., Коржавин А.А., Сеначин П.К. Анализ влияния различных факторов на характеристики взрывоопасности метана // Ползуновский вестник. 2012. №3-1. url: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-razlichnyh-faktorov-na-harakteristiki-vzryvoopasnosti-metana> (дата обращения: 16.10.2025).

## References

1. The role of renewable energy sources and secondary renewable energy sources in the energy management of the European Union countries / A.A. Nastenko, V. V. Filatov, A.L. Zolkin, O.A. Polyanskaya // Microeconomics. – 2024. – No. 5. – pp. 65-77. – DOI 10.33917/mic-5.118.2024.65-77. – EDN IXSSDW.
2. Myachin, V.V. The danger of fire gases in non-gas mines in emergency conditions / V.V. Myachin, S.A. Sharov // Occupational safety in industry. – 2004. – No. 2. – pp. 34-35. – EDN JVGXV.
3. Detection, location and assessment of the condition of underground fires by radon anomalies on the Earth's surface / V.A. Portola, O.V. Tailakov, Lee Hee Un [et al.] // Coal. – 2021. – № 5(1142). – Pp. 47-52. – DOI 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52. – EDN JLPNSN.
4. Rosstat. [electronic resource]. URL: [rosstat.gov.ru](https://rosstat.gov.ru) (accessed: 01.07.2025).
5. Balovtsev, S.V. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines / S.V. Balovtsev, O.V. Skopintseva, E.Yu. Kulikova // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2024. – No. 12. – P. 135-149. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_135. – EDN ZLPAPA.
6. Koptev, M.Y. Determination of the degree of participation of coal dust in an explosion, taking into account the content of inert dust in a mixture during a mine accident / M.Y. Koptev, M.S. Sazonov // Coal. – 2025. – № 1(1189). – Pp. 58-63. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-1-58-63. – EDN AWWMKW.
7. Rudenko, V.A. Assessment of the readiness of auxiliary mining rescue teams of coal mines / V.A. Rudenko // Mining sciences and technologies. – 2024. – Vol. 9, No. 3. – pp. 243-249. – DOI 10.17073/2500-0632-2024-03-234. – EDN FNEMDL.

8. Optimization of the composition of aqueous solutions in a metastable phase state for fire extinguishing / R.V. Khalikov, V.V. Royenko, I.R. Begishev, O.V. Dvoenko // Occupational safety in industry. – 2022. – No. 10. – pp. 15-20. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-10-15-20. – EDN PGNYMI.
9. Khalikov, R.V. Modeling of the process of methane phlegmatization with temperature-activated water in a closed volume of thermal power plants / R.V. Khalikov, T.N. Khalikova // Occupational safety in industry. – 2025. – No. 1. – pp. 37-43. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-1-37-43. – EDN TOUIYU.
10. Ishchenko, A.D. Experiments of extinguishing fires of power plants and premises of ships (ships) with an aqueous medium in a volumetric manner / A.D. Ishchenko, V.V. Royenko, I.G. Malygin // Marine intelligent technologies. – 2018. – № 3-1(41). – Pp. 128-134. – EDN YMNXPXN.
11. Kasym, K.J. Method of limiting the spread of gorenje products in open spaces / K.J. Kasym, A.D. Ishchenko, A.I. Sokovnin // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2024. – No. 3. – PP. 65-72. – DOI 10.25257/FE.2024.3.65-72. – EDN LROLNQ.
12. On the issues of verification of the results of heat flow modeling by the field method / R.V. Mironenko, M.V. Sibiryakov, A.I. Sokovnin, R.K. Ibatulin // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2023. – No. 1. – pp. 30-43. – DOI 10.25257/FE.2023.1.30-43. – EDN ZWJWBH.
13. Khalikov, R.V. Investigation of complex inhibitory compounds for volumetric fire extinguishing by aquatic media / R.V. Khalikov, A.D. Korolchenko // Fire and explosion safety. – 2025. – Vol. 34, No. 2. – pp. 60-68. – DOI 10.22227/0869-7493.2025.34.02.60-68. – EDN ENTGPY.
14. Bychkov S.V., Gerusov A.I. A decade of explosion at the Ulyanovsk mine. Analysis of the conclusions of the state Commission and mining specialists // Bulletin of the Scientific Center. 2016. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/desyatiletie-vzryva-na-shahte-ulyanovskaya-analizyvodov-gosudarstvennoy-komissii-i-gornyh-spetsialistov> (accessed: 26.08.2025).
15. Risk Assessment of Coal and Gas Outburst Accidents in Coal Mines Based on Factor Analysis and Logistic Regression / X. Li, Yu. Li, Z. Fa, E. Alam // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2022. – No. 10-1. – P. 116-127. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_101\_0\_116. – EDN WFRKKM.
16. Kupriyanov, V.V. Recognition of classes of underground accidents in coal mines based on neural network technology / V.V. Kupriyanov // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2022. – No. 8. – pp. 148-157. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_148. – EDN BIHIGI.
17. Balovtsev, S.V. Assessment of the influence of heavy hydrocarbons on the aerological risks of accidents in coal mines / S.V. Balovtsev, O.V. Skopintseva, E.Y. Kulikova // Sustainable development of mountainous territories. – 2023. – Vol. 15, No. 2(56). – pp. 234-245. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245. – EDN WAIFPS.
18. Balovtsev, S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines / S.V. Balovtsev // Mining sciences and technologies. – 2023. – Vol. 8, No. 4. – pp. 350-359. – DOI 10.17073/2500-0632-2023-10-163. – EDN WBQXEQ.
19. Comparative analysis of detonation and deflagration types of explosive transformation on the example of real emergency situations / A.A. Komarov, V.V. Timokhin, A.P. Shevchenko, R.R. Shangaraev // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2024. – No. 4. – pp. 64-71. – DOI 10.25257/FE.2024.4.64-71. – EDN CCWOGK.
20. Royenko, V.V. Technology of temperature-activated water: physical essence, development history, development prospects / V.V. Royenko, A.P. Karmes // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2017. – No. 3. – Pp. 15-20. – DOI 10.25257/FE.2017.3.15-20. – EDN ZITMYL.
21. Bunev V.A., Korzhavin A.A., Senachin P.K. Analysis of the influence of various factors on the explosive properties of methane // Polzunovskiy vestnik. 2012. No.3-1. url: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-razlichnyh-faktorov-na-harakteristiki-vzryvoopasnosti-metana> (accessed: 16.10.2025).

Информация об авторах

Р.В. Халиков – кандидат технических наук

Б.Б. Гринченко – кандидат технических наук

Ю.Н. Коваль – кандидат биологических наук, доцент

Н.В. Мартинович – кандидат технических наук

Information about authors

R.V. Khalikov – Ph.D. of Engineering Sciences

B.B. Grinchenko – Ph.D. of Engineering Sciences

Yu.N. Koval – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor

N.V. Martinovich Ph.D. of Engineering Sciences

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 18.12.2025, принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 18.12.2025, accepted for publication 20.12.2025.