

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

И.О. Федоткин

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Аннотация: Целью работы являлось установление влияния измерительной конфигурации на точность нейросетевой оценки расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара в горной выработке. Набор данных был сформирован по результатам многопараметрического моделирования в программном комплексе Fire Dynamics Simulator при варьировании скорости вентиляционного потока, пиковой мощности тепловыделения и времени ее достижения. В качестве входных данных нейросетевой модели использовались временные окна значений температуры и концентрации оксида углерода продолжительностью 30 с, а также скорость вентиляционного потока. Сопоставлены семь измерительных конфигураций: одно- и двухточечные схемы с использованием только температуры или только концентрации СО, а также одно-, двух- и трехточечные схемы с совместным использованием обоих каналов. Результаты оценивались по пяти независимым повторам вычислительного эксперимента. Установлено, что совместное использование температуры и концентрации СО обеспечивает наиболее выраженное снижение ошибок. Переход от одноточечной комбинированной конфигурации к двухточечной дополнительно уменьшил среднюю абсолютную ошибку определения расстояния до очага на 19,6%, а оценки текущей мощности тепловыделения – на 23,0%. При этом добавление третьей комбинированной точки обеспечило существенно меньший дополнительный эффект. Характер различий между конфигурациями в целом сохранялся и при анализе 90-го перцентиля абсолютной ошибки. В рамках принятой постановки задачи двухточечная комбинированная конфигурация может рассматриваться как рационально достаточная среди исследованных измерительных схем.

Ключевые слова: подземный пожар, горная выработка, искусственная нейронная сеть, измерительная конфигурация, мощность тепловыделения пожара, оксид углерода, машинное обучение, расстояние до очага пожара.

Для цитирования: Федоткин И. О. Влияние измерительной конфигурации на точность оперативной оценки параметров пожара в горной выработке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 152–161. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_152.

Influence of measurement setup on precision of operational evaluation of fire parameters in mines

I.O. Fedotkin

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Abstract: The study aims to determine the influence of a measurement setup on precision of the neural network evaluation of the distance to fire and the fire-induced heat build-up in an underground opening. The data set was generated from the multi-parametric modeling in software system Fire Dynamics Simulator with variation of the ventilation airflow velocity, peak rate of heat generation and the peak rate time. The input data of the neural network model were the time windows of temperatures and carbon oxide concentrations with a duration of 30 s, as well as the ventilation airflow velocities. Seven measurement setups were constructed: one- and two-point schemes using only temperature or only CO concentrations, as well as one-, two- and three-point schemes using both channels. The results were estimated by five independent iterations of a computational experiment. It is found that the joint use of temperature and CO concentration ensures the highest error reduction. Transition from a one-point to a two-point joint setup additionally decreased the average absolute error of the distance to the fire seat by 19.6% and the current heat generation rate by 23.0%. Meanwhile, inclusion of the third joint point produced much lesser additional effect. The character of the difference between the setups kept on in the analysis of the 90th percentile of absolute error. In the framework of the adopted problem formulation, the two-point joint setup can be assumed as a rationally sufficient layout amongst the tested measurement setups.

Key words: underground fire, underground opening, artificial neural network, measurement setup, fire heat generation rate, carbon oxide, machine learning, distance to fire seat.

For citation: Fedotkin I. O. Influence of measurement setup on precision of operational evaluation of fire parameters in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):152-161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_152.

Введение

Подземные пожары остаются одной из наиболее значимых проблем обеспечения безопасности горных работ, поскольку распространение тепла и токсичных продуктов горения по горным выработкам создает угрозу жизни и здоровью работников, затрудняет эвакуацию и проведение горноспасательных работ [1–3]. Кроме того, пожары в угольных шахтах могут также стать причиной разрушительных взрывов газа и угольной пыли, приводящих к многочисленным жертвам [4–6].

Для принятия обоснованных решений при развитии аварии недостаточно располагать только сведениями о факте возникновения пожара. Существенное значение имеют также данные о местоположении очага и текущем состоянии пожара [7, 8]. Одной из наиболее содержательных количественных характерис-

тик 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 [9–11]. Измерение мощности тепловыделения и точное определение местоположения очага в условиях развивающегося подземного пожара сопряжены со значительными трудностями, поэтому особый интерес представляет их косвенная оценка по параметрам, доступным для непрерывного инструментального контроля [8, 12, 13].

Одним из наиболее перспективных подходов к решению подобных задач является применение методов машинного обучения, в том числе нейронных сетей. Однако точность решения таких обратных задач в значительной степени зависит от достаточности входных дан-

ных, в том числе от количества точек и каналов измерения информативных параметров [14, 15].

В связи с этим целью данного исследования является определение рационально достаточной измерительной конфигурации для совместной оценки расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара в горной выработке с использованием нейросетевой модели. Под рационально достаточной понимается конфигурация, которая в пределах рассмотренного набора измерительных схем обеспечивает основную часть достигаемого совокупного прироста точности по обеим целевым переменным без необоснованного увеличения числа точек и измерительных каналов. Для достижения поставленной цели сопоставлялись измерительные конфигурации, включающие от одной до трех точек измерения температуры и концентрации оксида углерода. Сравнение проводилось при одинаковых условиях формирования выборки, обучения и тестирования модели по средней абсолютной ошибке, ее нормированному значению и 90-му процентилю абсолютной ошибки.

Постановка задачи

Набор данных формировался по результатам CFD-моделирования пожаров в программном комплексе Fire Dynamics Simulator (FDS). Выбор данного подхода обусловлен тем, что методы вычислительной гидрогазодинамики позволяют рассчитывать изменение температурных полей и распространение продуктов сгорания с учетом влияния вентиляции и нестационарного характера развития пожара [16–18]. При этом FDS является специализированным программным комплексом для моделирования пожаров и использовался в значительном количестве исследований, посвященных изучению пожаров в тоннелях и протя-

женных подземных сооружениях [18–20].

Расчетная область представляла собой протяженную горную выработку прямоугольного сечения высотой 2,4 м, шириной 3,2 м и длиной 220 м с продольной вентиляцией. Источник пожара располагался по ходу вентиляционного потока на расстоянии 210 м от выходной границы и задавался как площадной очаг размером 2,4×2,4 м (площадью 5,76 м²), характеризующий обобщенный экзогенный пожар в горной выработке. Динамика роста тепловыделения на начальной стадии задавалась по квадратичному закону (*t*-squared fire) [21–23].

При формировании набора сценариев варьировались пиковая мощность тепловыделения пожара в диапазоне от 1 до 5 МВт, скорость вентиляционного потока в диапазоне от 1 до 5 м/с, а также время достижения пиковой мощности тепловыделения, которое составляло 120, 180 или 240 с.

В контрольных точках, находящихся у кровли выработки на высоте 2,2 м, регистрировались значения температуры и концентрации оксида углерода (СО). Точки измерения располагались на расстоянии от 10 до 200 м от источника пожара по направлению вентиляционного потока. Для непосредственной сопоставимости измерительных конфигураций диапазон положений ближайшей к очагу точки был ограничен значениями от 10 до 160 м. В конфигурациях, состоящих из нескольких точек, дополнительные точки измерения располагались далее по направлению вентиляционного потока с шагом 20 м. В каждой точке p_i в момент времени t регистрировались две величины: температура газовой среды $T_i(t)$ и концентрация оксида углерода $C_i(t)$. 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. Для температуры это окно можно записать как

$$T_i(t) = [T_i(t), T_i(t - \Delta t_T), T_i(t - 2\Delta t_T), \dots, T_i(t - (n_T - 1)\Delta t_T)],$$

где n_T — число значений температуры во временном окне; Δt_T — шаг по времени между соседними значениями температуры.

Аналогично для концентрации оксида углерода использовалось окно вида

$$C_i(t) = [C_i(t), C_i(t - \Delta t_C), C_i(t - 2\Delta t_C), \dots, C_i(t - (n_C - 1)\Delta t_C)],$$

где n_C — число значений концентрации CO во временном окне; Δt_C — шаг по времени между соседними значениями концентрации CO.

В рассматриваемом случае принимались следующие параметры временного окна: $n_T = 16$, $\Delta t_T = 2$ с, $n_C = 4$, $\Delta t_C = 10$ с. Таким образом, для температуры и концентрации CO учитывалась история показаний продолжительностью 30 с.

В данном исследовании применялась многослойная полносвязная искусственная нейронная сеть, реализованная на языке Python с использованием библиотеки PyTorch. Архитектура сети включала три скрытых слоя размерностью 512, 256 и 128 нейронов. Для скрытых слоев использовалась функция активации ReLU. Обучение нейросетевой модели выполнялось с использованием функции потерь в виде средней абсолютной ошибки (L_1 loss) в стандартизованном пространстве целевых переменных и метода градиентной оптимизации AdamW, максимальное число эпох составляло 500.

В качестве входных данных нейросетевой модели использовались временные окна температуры и концентрации CO, а также скорость вентиляционного потока. Целевыми переменными являлись расстояние до очага пожара относительно ближайшей к нему точки измерения D , м и текущее значение мощности тепловыделения пожара $Q(t)$, кВт.

Набор данных разделялся на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80:20 по уникальным идентификаторам FDS-сценариев. Такой способ разбиения был выбран для предотвращения утечки информации между выборками и оценки качества модели на сценариях, не использовавшихся при обучении. Для оценки устойчивости результатов весь эксперимент повторялся 5 раз с различными случайными инициализациями параметров модели и разбиениями сценариев, при этом в пределах каждого повтора для всех измерительных конфигураций использовалось одно и то же разбиение данных. Итоговые показатели рассчитывались как средние значения по пяти повторам, а для основных метрик дополнительно определялось стандартное отклонение.

В ходе исследования проводилось сравнение следующих 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 оценивалась средняя абсолютная ошибка (MAE), выражаемая в единицах измерения целевой переменной и определяемая как

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_j - \hat{y}_j|,$$

где y_j — истинное значение j -й целевой переменной; $\hat{y}_j$ — предсказанное значение соответствующей переменной; N — число объектов тестовой выборки.

В качестве дополнительной сравнительной метрики использовалась нормированная средняя абсолютная ошибка (NMAE, %), поскольку данная метрика позволяет сопоставить точность различных целевых переменных, выраженных в разных физических единицах измерения. Нормированная средняя абсолютная ошибка определялась как

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

где D_y — нормирующее значение, определяемое как диапазон истинных значений соответствующей целевой переменной на тестовой выборке.

Дополнительно для оценки верхней части распределения ошибок рассчитывался 90-й перцентиль абсолютной ошибки P_{90} , соответствующий значению абсолютной ошибки $|y_j - \hat{y}_j|$, ниже которого находится 90 % всех рассчитанных абсолютных ошибок для соответствующей целевой величины. Для сопоставления разных целевых переменных рассчитывались также нормированные значения P_{90} путем деления соответ-

ствующего перцентиля абсолютной ошибки на нормирующее значение D_y .

Результаты и обсуждение

Согласно полученным результатам, использование простейшей конфигурации 1(T), включающей одну точку измерения температуры, характеризуется относительно высокими ошибками при решении рассматриваемой задачи совместной оценки мощности тепловыделения $Q(t)$ и расстояния до очага пожара D . Нормированные средние абсолютные ошибки модели (NMAE) в данном случае составили 11,14% при оценке расстояния до очага пожара D и 6,81% при оценке текущей мощности тепловыделения $Q(t)$, что в физических единицах соответствует средней абсолютной ошибке 16,71 м по D и 354,1 кВт по $Q(t)$.

Конфигурация 1(CO), включающая только один канал измерения концентрации оксида углерода, характеризуется иным соотношением показателей. По сравнению с 1(T) она обеспечивает снижение ошибки оценки мощности тепловыделения пожара примерно на 42,9%, до 202,4 кВт, однако средняя абсолютная ошибка (MAE) расстояния до очага возрастает до 25,44 м (примерно на

Ошибки оценки расстояния до очага и мощности тепловыделения пожара

при использовании различных измерительных конфигураций

Errors in estimating fire-source distance and heat release rate

for different measurement configurations

Измерительная конфигурация	D , MAE, м	D , NMAE, %	$Q(t)$, MAE, кВт	$Q(t)$, NMAE, %
1(T)	16,71 ± 0,53	11,14 ± 0,35	354,1 ± 22,7	6,81 ± 0,39
1(CO)	25,44 ± 0,30	16,96 ± 0,20	202,4 ± 9,6	3,89 ± 0,17
1(T+CO)	4,85 ± 0,13	3,24 ± 0,09	121,4 ± 5,6	2,34 ± 0,10
2(T)	13,11 ± 0,38	8,74 ± 0,25	258,8 ± 9,7	4,98 ± 0,16
2(CO)	18,76 ± 0,22	12,50 ± 0,15	139,1 ± 6,6	2,68 ± 0,12
2(T+CO)	3,90 ± 0,11	2,60 ± 0,07	93,5 ± 5,2	1,80 ± 0,10
3(T+CO)	3,87 ± 0,14	2,58 ± 0,09	87,0 ± 3,5	1,67 ± 0,07

Примечание: результаты представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения по пяти независимым повторам вычислительного эксперимента.

52,3%), что делает данную конфигурацию худшей для оценки места расположения очага (таблица).

При добавлении второй точки измерения одного и того же параметра ошибки модели значительно снижаются, например, переход от конфигурации 1(CO) к 2(CO) сопровождается снижением средней абсолютной ошибки по расстоянию до очага на 26,3%, а по мощности тепловыделения пожара на 31,3% (с 202,4 до 139,1 кВт). Аналогичная ситуация наблюдается и при переходе от 1(T) к 2(T), где снижение ошибки составляет 21,5% и 26,9% соответственно.

Наиболее выраженное повышение точности наблюдается при совместном использовании температуры и концентрации оксида углерода уже в одной точке измерения. Для конфигурации 1(T+CO) NMAE составляет 3,24% по D и 2,34% по $Q(t)$, что существенно ниже значений, полученных при использовании только температуры или только концентрации CO в одной точке. Относительно конфигурации 1(T) средняя ошибка оценки расстояния до очага уменьшается примерно на 70,9%, а текущей мощности тепловыделения на 65,7%. По сравнению с 1(CO) соответствующее снижение составляет около 80,9 и 40,0%. Полу-

ченный результат свидетельствует о взаимодополняющем характере учета температуры и концентрации CO при совместной оценке расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара.

Добавление еще одной пространственно-разнесенной точки также повышает информативность комбинированной схемы. Переход от 1(T+CO) к 2(T+CO) приводит к дальнейшему снижению ошибки по обоим целевым переменным: средняя абсолютная ошибка расстояния до очага уменьшается с 4,85 до 3,90 м, то есть примерно на 19,6%, а ошибка оценки текущей мощности тепловыделения — с 121,4 до 93,5 кВт, примерно на 23,0%. Такой результат согласуется с наблюдениями для одноканальных конфигураций и может быть обусловлен появлением информации о пространственном изменении температуры и концентрации CO вдоль выработки, что способствует снижению неоднозначности при решении обратной задачи.

Вместе с тем дальнейшее увеличение числа комбинированных точек сопровождается существенно меньшим эффектом (рис. 1). При переходе от 2(T+CO) к 3(T+CO) средняя ошибка оценки расстояния практически не изменяется,

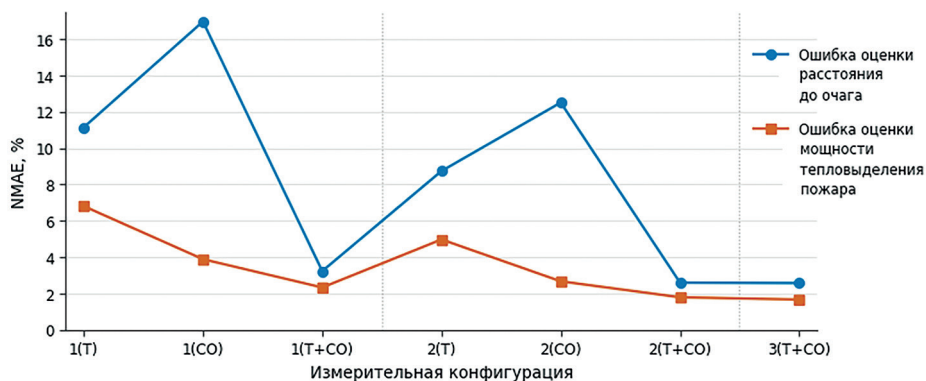


Рис. 1. Нормированная средняя абсолютная ошибка при оценке расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения для различных измерительных конфигураций

Fig. 1. Normalized mean absolute error in estimating the distance to the fire source and current heat release rate for different measurement configurations

уменьшаясь с 3,90 до 3,87 м, то есть менее чем на 1%. Для текущей мощности тепловыделения снижение более заметно, однако также сравнительно невелико — с 93,5 до 87,0 кВт, то есть примерно на 7%. Следовательно, основная часть эффекта от увеличения пространственной информативности достигается уже при использовании двух комбинированных точек.

Для дополнительной оценки качества модели в верхней части распределения ошибок проведен анализ 90-го перцентиля абсолютной ошибки P_{90} . Характер изменения данного показателя в зависимости от измерительной конфигурации в целом соответствует наблюдениям, полученным по средней ошибке. Наибольшие значения нормированного P_{90} получены для одноканальных схем, тогда как совместное использование температуры и концентрации СО обеспечивает существенное их снижение (рис. 2).

Значения P_{90} при оценке расстояния до очага для конфигураций 1(Т) и 1(СО) составляют соответственно 38,61 и 54,81 м. Для мощности тепловыделения соответствующие значения также остаются высокими, составляя 869,6 и 526,8 кВт. При этом совместное изме-

рение температуры и СО в одной точке снижает до 9,10 м и 307,9 кВт, что особенно заметно при определении расстояния до очага. Дальнейшее снижение наблюдается при переходе к комбинированной конфигурации 2(Т+СО), для которой P_{90} составляет 6,60 м по D и 219,5 кВт по $Q(t)$. По сравнению с 1(Т+СО) это соответствует уменьшению P_{90} примерно на 27,5% для расстояния и на 28,7% для мощности тепловыделения. При этом нормированные значения P_{90} для 2(Т+СО) составляют соответственно 4,40 и 4,22% и впервые среди рассмотренных конфигураций становятся ниже 5% по обоим целевым переменным.

Добавление третьей комбинированной точки практически не оказывает влияния на P_{90} по расстоянию до очага, а в случае с мощностью тепловыделения дополнительное снижение P_{90} составляет около 6,6% относительно 2(Т+СО).

Таким образом, в принятой постановке задачи и рассмотренном диапазоне сценариев конфигурация 2(Т+СО) может рассматриваться как рационально достаточная для совместной оценки расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара, поскольку она обеспечивает основную часть до-

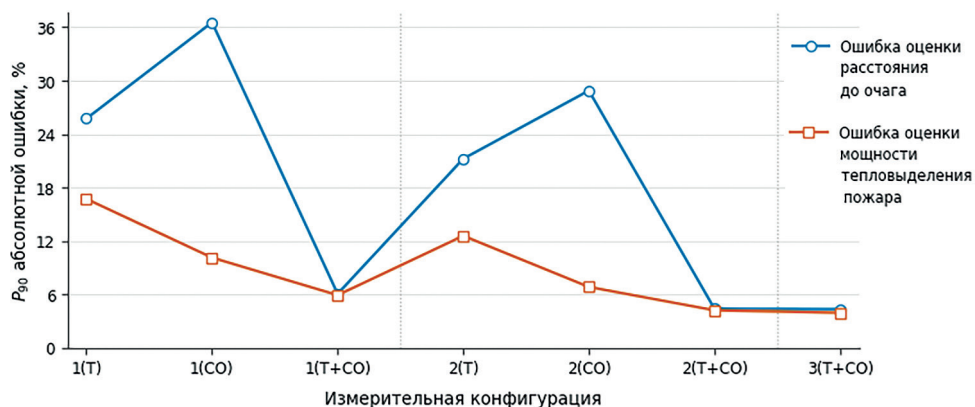


Рис. 2. Нормированный 90-й перцентиль абсолютной ошибки при оценке расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения для различных измерительных конфигураций

Fig. 2. Normalized 90th percentile of absolute error in estimating the distance to the fire source and current heat release rate for different measurement configurations

стигаемого совокупного прироста точности, в то время как дальнейшее увеличение числа комбинированных точек приводит лишь к сравнительно небольшому дополнительному улучшению.

Заключение

Результаты исследования показывают, что на точность совместной оценки расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара с использованием искусственной нейронной сети значительное влияние оказывают состав измерительной конфигурации и наличие пространственно-разнесенных точек. Установлено, что совместное измерение температуры и концентрации СО позволяет значительно снизить ошибки оценки по обоим целевым переменным, что свидетельствует о взаимодополняющем характере содержащейся в них инфор-

мации. При этом добавление второй комбинированной точки обеспечивает наименьший существенный прирост точности как при оценке расстояния до очага, так и при оценке текущей мощности тепловыделения пожара.

В то же время при переходе от конфигурации 2(Т+СО) к 3(Т+СО) наблюдается существенно меньший дополнительный эффект.

Таким образом, в принятой постановке задачи и рассмотренном в исследовании диапазоне сценариев конфигурация с двумя пространственно-разнесенными точками, в каждой из которых измеряется температура и концентрация СО, может рассматриваться как рационально достаточная для совместной оценки расстояния до очага и текущей мощности тепловыделения пожара среди исследованных измерительных схем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang W., Wu J., Ren H., Li Z., Yi H., Guo Y., Shang X., Shu C.-M. Study on the toxicity of fire smoke from mining conveyor belts // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025, vol. 150, no. 1, pp. 201 – 210. DOI: 10.1007/s10973-024-13924-9.
2. Bi L., Liu Y., Zhong D., Wen L. Multi-objective real-time planning of evacuation routes for underground mine fires // *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 17, article 7521. DOI: 10.3390/app14177521.
3. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Анализ аварийности и тенденции развития аэрологической безопасности угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 12. – С. 135 – 149. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_135.
4. Хоанг Хунг Тханг, Голик В. И. Анализ ключевых факторов, влияющих на безопасность при отработке угольных пластов в шахтах провинции Куангнинь, Вьетнам // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2026. – № 3. – С. 152 – 169. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_152.
5. Ran D., Cheng J., Zhang R., Wang Y., Wu Y. Damages of underground facilities in coal mines due to gas explosion shock waves: An overview // *Shock and Vibration*. 2021, vol. 2021, article 8451241. DOI: 10.1155/2021/8451241.
6. Скопинцева О. В., Рыбичев А. А., Баловцев С. В. Нейтрализация взрывчатых свойств остаточных углеводородов угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2025. – № 11. – С. 140 – 152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.
7. Коршунов Г. И., Мироненкова Н. А., Полещук А. А. Актуальные методы определения очагов самовозгорания на угольных шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2025. – № 5. – С. 169 – 180. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_169.
8. Yuan L., Thomas R. A., Zhou L. Characterization of a mine fire using atmospheric monitoring system sensor data // *Mining Engineering*. 2017, vol. 69, no. 6, pp. 57 – 62. DOI: 10.19150/me.756.
9. Babrauskas V., Peacock R. D. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard // *Fire Safety Journal*. 1992, vol. 18, no. 3, pp. 255 – 272. DOI: 10.1016/0379-7112(92)90019-9.
10. Salami O. B., Kumar A. R., Aamir I., Pushparaj R. I., Xu G. Enhancing fire safety in underground mines: Experimental and large eddy simulation of temperature attenuation, gas evolution, and

bifurcation influence for improved emergency response // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024, vol. 183, pp. 260 – 273. DOI: 10.1016/j.psep.2023.12.056.

11. Кожевин Д. Ф., Самигуллин Г. Х. Определение мощности теплопоглощения огнетушащих порошковых составов при тушении пожаров на объектах угольной отрасли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2026. – № 3. – С. 136 – 151. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_136.

12. Zhou L., Yuan L., Thomas R., Bahrami D., Rowland J. An improved method to calculate the heat release rate of a mine fire in underground mines // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1941 – 1949. DOI: 10.1007/s42461-020-00276-9.

13. Bahrami D., Zhou L., Yuan L. Field verification of an improved mine fire location model // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 559 – 566. DOI: 10.1007/s42461-020-00314-6.

14. Cao Y., Ma H., Wang S., Zhang Y. Building fire location predictions based on FDS and hybrid modelling // *Buildings*. 2025, vol. 15, no. 12, article 2001. DOI: 10.3390/buildings15122001.

15. Yang Y., Zhang G., Zhu G., Yuan D., He M. Prediction of fire source heat release rate based on machine learning method // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024, vol. 54, article 104088. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104088.

16. Yuan L., Zhou L., Smith A. C. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires // *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 100, pp. 1319 – 1326. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.007.

17. Копылов Н. П., Федоткин Д. В., Карпов А. В., Сушкина Е. Ю. Моделирование тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах с применением водопенных огнетушащих веществ // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 8. – С. 14 – 22. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-14-22.

18. Weisenpacher P., Glasa J., Valasek L. Investigation of various fire dynamics simulator approaches to modelling airflow in road tunnel induced by longitudinal ventilation // *Fire*. 2025, vol. 8, no. 2, article 74. DOI: 10.3390/fire8020074.

19. Fernández-Alaiz F., Castañón A. M., Gómez-Fernández F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-Scale tests and CFD modeling // *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 10, article 3380. DOI: 10.3390/app10103380.

20. Ang C. D., Rein G., Peiró J., Harrison R. Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6 // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, vol. 52, pp. 119 – 126. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.003.

21. Kurioka H., Oka Y., Satoh H., Sugawa O. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels // *Fire Safety Journal*. 2003, vol. 38, no. 4, pp. 319 – 340. DOI: 10.1016/S0379-7112(02)00089-9.

22. Mowrer F. W., Williamson R. B. Methods to characterize heat release rate data // *Fire Safety Journal*. 1990, vol. 16, no. 5, pp. 367 – 387. DOI: 10.1016/0379-7112(90)90009-4.

23. Ingason H. Design fire curves for tunnels // *Fire Safety Journal*. 2009, vol. 44, no. 2, pp. 259 – 265. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.06.009. **MIAB**

REFERENCES

1. Wang W., Wu J., Ren H., Li Z., Yi H., Guo Y., Shang X., Shu C.-M. Study on the toxicity of fire smoke from mining conveyor belts. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025, vol. 150, no. 1, pp. 201 – 210. DOI: 10.1007/s10973-024-13924-9.

2. Bi L., Liu Y., Zhong D., Wen L. Multi-objective real-time planning of evacuation routes for underground mine fires. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 17, article 7521. DOI: 10.3390/app14177521.

3. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 12, pp. 135 – 149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_135.

4. Hoang Hung Thang, Golik V. I. Analysis of key factors affecting safety in coal seam mining in Quang Ninh region, Vietnam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 3, pp. 152 – 169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_152.

5. Ran D., Cheng J., Zhang R., Wang Y., Wu Y. Damages of underground facilities in coal mines due to gas explosion shock waves: An overview. *Shock and Vibration*. 2021, vol. 2021, article 8451241. DOI: 10.1155/2021/8451241.

6. Skopintseva O. V., Rybichev A. A., Balovtsev S. V. Neutralization of the explosive properties of residual hydrocarbons in coal seams by gas-filled solutions of surfactant agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 11, pp. 140 – 152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.

7. Korshunov G. I., Mironenkova N. A., Poleshchuk A. A. The topical methods of detecting spontaneous combustion sources in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 5, pp. 169 – 180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_169.
8. Yuan L., Thomas R. A., Zhou L. Characterization of a mine fire using atmospheric monitoring system sensor data. *Mining Engineering*. 2017, vol. 69, no. 6, pp. 57 – 62. DOI: 10.19150/me.756.
9. Babrauskas V., Peacock R. D. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard. *Fire Safety Journal*. 1992, vol. 18, no. 3, pp. 255 – 272. DOI: 10.1016/0379-7112(92)90019-9.
10. Salami O. B., Kumar A. R., Aamir I., Pushparaj R. I., Xu G. Enhancing fire safety in underground mines: Experimental and large eddy simulation of temperature attenuation, gas evolution, and bifurcation influence for improved emergency response. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024, vol. 183, pp. 260 – 273. DOI: 10.1016/j.psep.2023.12.056.
11. Kozhevnikov D. F., Samigullin G. H. Heat absorption capacity of fire-extinguishing powder compositions in fire suppression in the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 3, pp. 136 – 151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_136.
12. Zhou L., Yuan L., Thomas R., Bahrami D., Rowland J. An improved method to calculate the heat release rate of a mine fire in underground mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1941 – 1949. DOI: 10.1007/s42461-020-00276-9.
13. Bahrami D., Zhou L., Yuan L. Field verification of an improved mine fire location model. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 559 – 566. DOI: 10.1007/s42461-020-00314-6.
14. Cao Y., Ma H., Wang S., Zhang Y. Building fire location predictions based on FDS and hybrid modelling. *Buildings*. 2025, vol. 15, no. 12, article 2001. DOI: 10.3390/buildings15122001.
15. Yang Y., Zhang G., Zhu G., Yuan D., He M. Prediction of fire source heat release rate based on machine learning method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024, vol. 54, article 104088. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104088.
16. Yuan L., Zhou L., Smith A. C. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 100, pp. 1319 – 1326. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.007.
17. Kopylov N. P., Fedotkin D. V., Karpov A. V., Sushkina E. Yu. Modeling of extinguishing of oil product fires in the tanks using water-based extinguishing agents. *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 8, pp. 14 – 22. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-14-22.
18. Weisenpacher P., Glasa J., Valasek L. Investigation of various fire dynamics simulator approaches to modelling airflow in road tunnel induced by longitudinal ventilation. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 2, article 74. DOI: 10.3390/fire8020074.
19. Fernández-Alaiz F., Castañón A. M., Gómez-Fernández F., Bascompta M. Mine fire behavior under different ventilation conditions: Real-Scale tests and CFD modeling. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 10, article 3380. DOI: 10.3390/app10103380.
20. Ang C. D., Rein G., Peiró J., Harrison R. Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, vol. 52, pp. 119 – 126. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.003.
21. Kurioka H., Oka Y., Satoh H., Sugawa O. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels. *Fire Safety Journal*. 2003, vol. 38, no. 4, pp. 319 – 340. DOI: 10.1016/S0379-7112(02)00089-9.
22. Mowrer F. W., Williamson R. B. Methods to characterize heat release rate data. *Fire Safety Journal*. 1990, vol. 16, no. 5, pp. 367 – 387. DOI: 10.1016/0379-7112(90)90009-4.
23. Ingason H. Design fire curves for tunnels. *Fire Safety Journal*. 2009, vol. 44, no. 2, pp. 259 – 265. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.06.009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федоткин Илья Олегович — аспирант, Университет науки и технологий МИСИС,
e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-2399-480X.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

I.O. Fedotkin, Graduate Student, University of Science and Technology MISIS,
119049, Moscow, Russia, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-2399-480X.

Получена редакцией 10.07.2026; получена после рецензии 24.08.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 10.07.2026; received after the review 24.08.2026; accepted for printing 20.09.2026.