

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ВЫРАБОТКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ И СТРАТИФИКАЦИЮ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

И.О. Федоткин¹, О.В. Скопинцева¹, С.В. Баловцев¹

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Аннотация: Исследовано влияние продольного угла наклона шахтной выработки на газодинамические процессы распространения продуктов горения при подземных пожарах. Целью исследования является количественная оценка изменения кинематики движения теплового и газового фронтов, а также параметров вертикальной стратификации атмосферы в наклонных выработках. Исследование выполнено с использованием программного комплекса Fire Dynamics Simulator для сценария пожара с пиковой мощностью 3 МВт при скорости вентиляционного потока 1,5 м/с. В рамках работы проведена оценка сеточной чувствительности и обоснован выбор параметров дискретизации, обеспечивающих баланс точности и вычислительных затрат. В ходе параметрического анализа в диапазоне углов наклона от -20° до $+20^\circ$ выявлен нелинейный характер взаимодействия сил вентиляционной тяги и термогравитационной плавучести. Установлена выраженная кинематическая асимметрия процесса: отрицательный уклон при нисходящем проветривании приводит к существенному замедлению фронта опасных факторов (до 11% при угле -20°), тогда как положительный уклон оказывает лишь умеренное ускоряющее воздействие в пределах 3–4%. Также обнаружен эффект дивергенции условий стратификации, при котором максимум вертикальной неоднородности температуры достигается при угле $+5^\circ$, а концентрации оксида углерода – при -5° . Показано, что при больших отрицательных углах наклона (-20°) наблюдается резкое ослабление температурной стратификации.

Ключевые слова: подземный пожар, угол наклона, Fire Dynamics Simulator, моделирование пожара, сеточная чувствительность, вертикальная стратификация, угольная шахта, время прибытия фронта, распространение монооксида углерода.

Для цитирования: Федоткин И. О., Скопинцева О. В., Баловцев С. В. Моделирование влияния угла наклона выработки на распространение и стратификацию продуктов горения при пожаре в угольной шахте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_169.

Modeling the influence of the angle of working on the propagation and stratification of combustion products during a fire in a coal mine

I.O. Fedotkin¹, O.V. Skopintseva¹, S.V. Balovtsev¹

¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia,
e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Abstract: The study focuses on the influence exerted by the longitudinal slope of a mine roadway on gas dynamics of combustion products during underground fires. The aim of the study is the evaluation of change in the kinematics of heat and gas fronts, as well as in the parameters of vertical stratification of air in sloped roadways. The study used Fire Dynamics Simulator to model a fire scenario at a peak rate of heat generation of 3 MW and at a ventilation airflow velocity of 1.5 m/s. Within the scope of the study, the mesh sensitivity was assessed, and the discretization parameters to balance precision and cost of computation were selected. The parametric analysis revealed the nonlinear pattern of interaction between the ventilation draft and thermogravitational convection in a range of the slope angles from -20° to $+20^\circ$. A pronounced kinematic asymmetry is detected in the process being analyzed: a negative slope during down-current leads to a slow-down of front of hazardous factors (to 11% at the slope of -20°), while a positive slope produces a moderate acceleration effect within 3–4%. Furthermore, the effect of divergency is determined in stratification, when the maximum of the vertical temperature nonuniformity is attained at the angle of $+5^\circ$ and the maximum of the carbon dioxide concentration—at -5° . It is shown that at high negative slopes (-20°), the temperature stratification drops.

Key words: underground fire, slope angle, Fire Dynamics Simulator, fire modeling, mesh sensitivity, vertical stratification, coal mine, front arrival time, carbon monoxide propagation.

For citation: Fedotkin I. O., Skopintseva O. V., Balovtsev S. V. Modeling the influence of the angle of working on the propagation and stratification of combustion products during a fire in a coal mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(4):169-180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_169.

Введение

Уголь по-прежнему является одним из ключевых энергоресурсов для мировой экономики. Сохранение высокого спроса на уголь, а также перераспределение центров добычи в регионы с долгосрочной ресурсной базой создают предпосылки для дальнейшей интенсификации горных работ, что также закреплено в программе развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Однако наращивание темпов добычи приводит к увеличению глубины ведения горных работ и сложности подземной инфраструктуры, что сопровождается повышением вероятности аварийных ситуаций [1, 2].

Самым распространенным видом аварий на предприятиях угледобычи за последние десятилетия являются пожары, которые приводят к серьезному экономическому ущербу, угрозе жизни и здо-

ровью горнорабочих и могут сами быть причиной разрушительных взрывов газов и пыли [3, 4].

В настоящее время для расчета вентиляции шахт широко применяются одномерные сетевые модели вентиляции и специализированные программные комплексы, такие как АэроСеть, Ventsim, MFIRE и др. [5–7]. Однако ряд ключевых эффектов, таких как формирование потолочного дымового слоя, конвективная стратификация воздуха и локальные рециркуляционные зоны, имеют принципиально трехмерную природу и, как правило, носят нестационарный характер, что выходит за рамки одномерных постановок. Это обуславливает необходимость применения методов вычислительной динамики жидкости и газа для исследования временной и пространственной структуры потоков в отдельной выработке [8, 9].

Исходя из этого, для детального анализа процессов распространения продуктов горения в наклонной выработке в данной работе был использован подход вычислительной динамики жидкости и газа на основе программного комплекса Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS реализует трехмерное моделирование низкоскоростных течений на основе численного решения уравнений Навье–Стокса с использованием метода крупных вихрей [10]. Такой подход зарекомендовал себя в большом числе исследований, посвященных моделированию пожаров в тоннелях и протяженных подземных сооружениях, включая задачи продольной вентиляции и оценки устойчивости вентиляционных режимов при наличии интенсивных источников тепла [11 – 13].

Целью настоящей работы является оценка влияния угла наклона шахтной выработки на динамику распространения фронтов температуры вдоль выработки и монооксида углерода (CO), а также характер стратификации полей температуры и концентраций CO.

Постановка задачи и оценка сеточной чувствительности

Расчеты 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. При этом теплообмен с массивом горных пород учитывался путем задания на стенках граничного условия инертной поверхности (INERT). Источник пожара задавался как площадной очаг размером 2,4×2,4 м (площадью 5,76 м²) с

удельным тепловыделением 521 кВт/м², 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 обобщенную 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 [14, 15].

При первоначальном выборе шага расчетной сетки использовался критерий, основанный на характеристическом диаметре пожара D^* (м).

Согласно работам [16, 17], характеристический диаметр определяется выражением

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5}, \quad (1)$$

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 расчетной 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 $D^*/\delta x = 4 \dots 16$ [18, 19].

Для рассматриваемого пожара мощностью $\dot{Q} = 3$ МВт значение характеристического диаметра, вычисляемое по формуле (1), 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 $\delta x = 0,4$ м; 7,5 при $\delta x = 0,2$ м и 15 при $\delta x = 0,1$ 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 CO₂. Датчики располагались с шагом 10 м в диапазоне расстояний 10...100 м от очага пожара по

Таблица 1

Средние показатели сеточной чувствительности по сравнению с контрольной сеткой (участок 10–100 м)
Average grid sensitivity metrics relative to the reference mesh (section 10–100 m)

Параметр	NMAE – нормализованная средняя абсолютная ошибка, % ($\delta x = 0,2$ м / 0,1 м)	NMAE – нормализованная средняя абсолютная ошибка, % ($\delta x = 0,4$ м / 0,1 м)	R^2 – коэффициент детерминации ($\delta x = 0,2$ м / 0,1 м)	R^2 – коэффициент детерминации ($\delta x = 0,4$ 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

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 $\delta x = 0,2$ и 0,4 м с контрольной сеткой 0,1 м при помощи следующих метрик.

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

$$NMAE = \frac{100}{y^{ref}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y_i^{ref}|, \quad (2)$$

где y_i – значение температуры или концентрации газа на исследуемой сетке в i -й момент времени; y_i^{ref} – соответствующее значение на контрольной сетке; y^{ref} – среднее арифметическое значение на контрольной сетке за рассматриваемый период времени; N – количество временных отсчетов (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. 1.

Во всех случаях контрольной сеткой выступает сетка с $\delta x = 0,1$ м.

Из табл. 1 видно, что при переходе от сетки 0,1 к 0,2 м средние значения NMAE по всем трем величинам не превышают 6,3% при коэффициенте детерминации $R^2 \sim 0,96$, 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 $\sim 7-8\%$), 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 трехмерной задаче, но время расчета растет еще 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) [20].

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 CO₂), а также существенный выигрыш в вычислительных затратах (время расчета уменьшается примерно в 18 раз по сравнению с сеткой 0,1 м), в дальнейших расчетах в качестве ра-

бочей сетки была принята именно она. Сетка 0,1 м использовалась только для проверки сеточной чувствительности и подтверждения того, что дальнейшее измельчение сетки нерационально с точки зрения улучшения прогноза ключевых параметров пожара в рассматриваемой конфигурации выработки.

Результаты и обсуждение

Далее были выполнены расчеты для серии углов наклона выработки при фиксированных параметрах пожара $\dot{Q}_{\max} = 3$ МВт и вентиляции (скорость вентиляционного потока 1,5 м/с) с целью количественной оценки влияния 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° (положительный угол соответствует подъему выработки по направлению вентиляционного потока), характерный для выработок угольных шахт [21].

Под временем прибытия фронта понимался момент первого достижения заданного порога концентрации монооксида углерода (CO), составляющего 20 ppm и соответствующего рабочему диапазону измерений промышленных газоанализаторов [22], и, соответственно, момент первого превышения значения температуры над фоном на $\Delta T = 5$ К.

Согласно рис. 1 и 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 пуль-

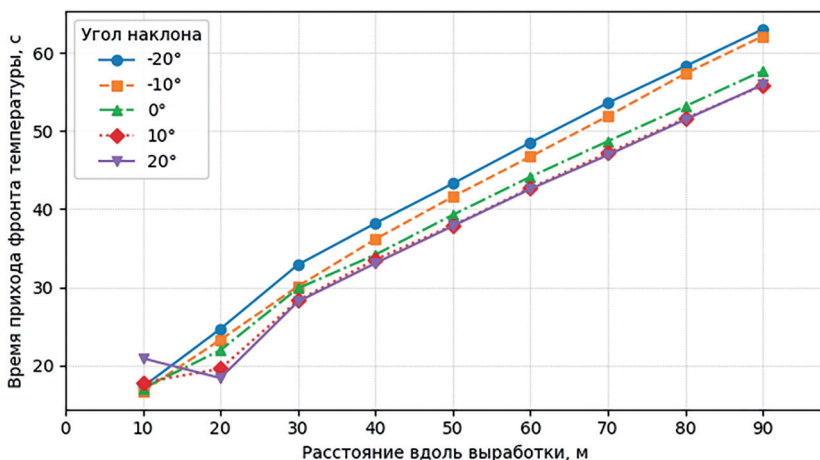


Рис. 1. Зависимость времени прибытия теплового фронта от расстояния вдоль выработки при различных углах наклона

Fig. 1. Dependence of the thermal front arrival time on the longitudinal distance for different inclination angles

саций 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.

Полученные данные показывают систематическое влияние уклона на время прибытия фронта CO и теплового фронта. При отрицательном значении угла наклона $\theta = -20^\circ$ 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 $\theta = -10^\circ$ данный показатель увеличивается на 8,6% и

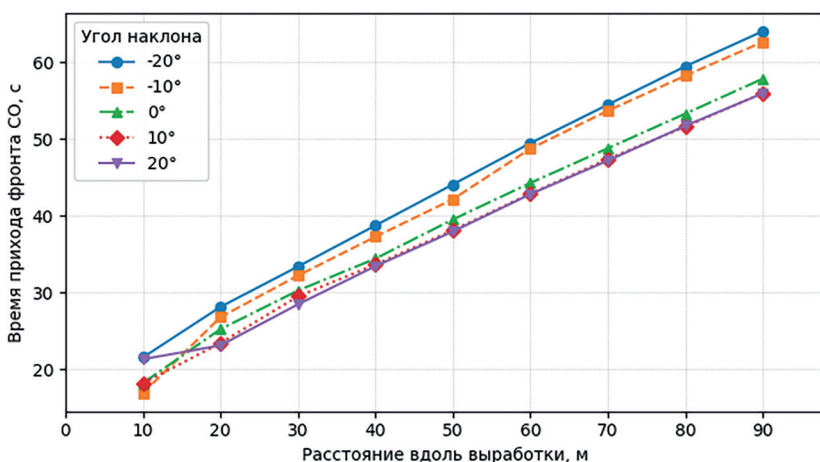


Рис. 2. Зависимость времени прибытия фронта монооксида углерода от расстояния вдоль выработки при различных углах наклона

Fig. 2. Dependence of the carbon monoxide front arrival time on the longitudinal distance for different inclination angles

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 $\theta = 10 \dots 20^\circ$ наблюдается умеренное уменьшение времени 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 создает противодействующий термогравитационный вклад, влияющий на формирование и устойчивость потолочного 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: $z_B = 2,2$ м (верхний уровень, у кровли) и $z_H = 1,0$ м (нижний уро-

вень). В квазистационарном интервале времени 120–300 с (после достижения источником пожара постоянной мощности) рассчитывались следующие величины:

$$\Delta T(x, \theta) = \bar{T}(x, z_B) - \bar{T}(x, z_H) \text{ и}$$

$$\Delta CO(x, \theta) = \overline{CO}(x, z_B) - \overline{CO}(x, z_H),$$

где \bar{T} и \overline{CO} – средние по времени значения температуры и объемной концентрации монооксида углерода на данном интервале.

На рис. 3 и 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 потолочный 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 максималь-

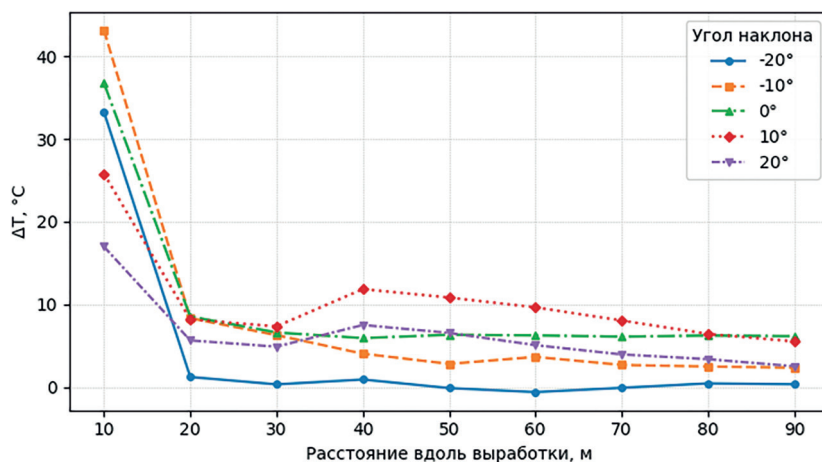


Рис. 3. Вертикальная неоднородность температуры вдоль выработки

Fig. 3. Vertical temperature stratification along the mine working

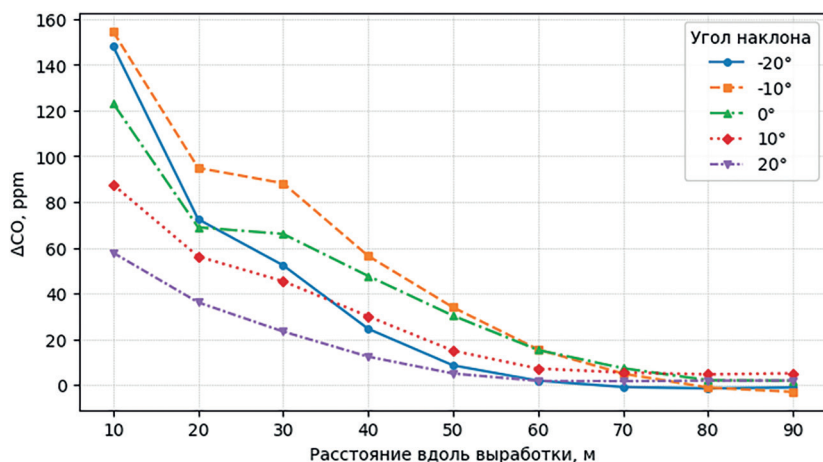


Рис. 4. Вертикальная неоднородность концентрации CO вдоль выработки
 Fig. 4. Vertical CO concentration stratification along the mine working

ное значение Δ_{\max} , с указанием координаты ее достижения (табл. 2).

Приведенные данные показывают, что тепловая стратификация максимальна при умеренном положительном наклоне. Например, средняя величина $\langle \Delta T \rangle$ при угле наклона выработки $\theta = 5^\circ$ 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 $\theta = 15^\circ$.

В дополнение к этому при отрицательных значениях угла наклона наблюдается постепенное снижение стратификации, вплоть до $\theta = -20^\circ$, 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

Таблица 2

Сводные показатели вертикальной неоднородности температуры и CO (20–90 м)
Summary metrics of vertical temperature and CO stratification (20–90 m)

Угол наклона $\theta, ^\circ$	$\langle \Delta T \rangle$ – средняя температурная стратификация, °C	ΔT_{\max} – максимальная температурная стратификация, °C ($x_{\max}, \text{м}$)	$\langle \Delta CO \rangle$ – средняя стратификация CO, ppm	ΔCO_{\max} – максимальная стратификация CO, ppm ($x_{\max}, \text{м}$)
-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)

от очага возгорания (рис. 4), что свидетельствует о необратимом характере турбулентной диффузии, приводящей к плавному выравниванию концентрационного слоя. При этом наибольшие средние значения $\langle \Delta CO \rangle$ наблюдаются при умеренных отрицательных углах $\theta = -5^\circ \dots -15^\circ$, с максимумом при наклоне $\theta = -5^\circ$ и постепенном снижении при дальнейшем уменьшении угла.

Данные по распределению температурной разности ΔT , напротив, демонстрируют наличие локального максимума при положительных углах наклона при $x = 40 \dots 60$ м, после которого наблюдается медленный спад (см. рис. 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.

Заключение

В работе выполнено CFD-моделирование пожара мощностью 3 МВт в горной выработке прямоугольного сечения с целью оценки влияния угла наклона выработки на продольное распространение продуктов горения и на вертикальную неоднородность температурного и концентрационного полей. В ходе оценки сеточной чувствительности модели было показано, что расчетная сетка с шагом 0,2 м обеспечивает высокую степень согласованности с контрольным решением (среднее отклонение $NMAE < 6,3\%$ для всех рассматриваемых параметров) при сокращении вычислительных затрат на порядок, что делает ее рациональным выбором для серийных расчетов при заданных параметрах модели. Анализ результатов моделирования выявил сложный характер

влияния угла наклона выработки на кинематику газового потока.

Установлено, что при нисходящем проветривании (отрицательные углы наклона) происходит выраженное замедление фронта опасных факторов вследствие встречного действия сил терोगравитационной плавучести. При этом максимальное замедление наблюдается при угле наклона -20° и достигает 11,4% для фронта оксида углерода (CO). 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.

Также зафиксировано несовпадение условий экстремумов стратификации для теплового и концентрационного полей. Максимум температурной стратификации $\langle \Delta T \rangle$ достигается при малом положительном угле наклона $\theta = +5^\circ$, тогда как для оксида углерода $\langle \Delta CO \rangle$ этот максимум находится в области отрицательных значений $\theta = -5^\circ$. При $\theta = -20^\circ$ 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. Это указывает на то, что в условиях крутых нисходящих выработок тепловая и газовая обстановки могут развиваться по разным сценариям, что требует комплексного подхода к оценке безопасности на путях эвакуации.

Полученные наблюдения и количественные оценки могут быть полезны при совершенствовании алгоритмов интерпретации сигналов систем аэрогазового контроля, а также при уточнении подходов к оценке условий и выбору маршрутов эвакуации персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанов Е. И. Анализ риска аварий на угольных шахтах с учетом человеческого фактора // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 48–54. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.
2. Босиков И. И., Ключев Р. В., Аймбетова И. О., Махошева С. А. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 397–405. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.
3. Bosikov I. I., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits // Fire. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.
4. Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X., Liu F. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 121, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.
5. Nematollahi Sarvestani A., Oreste P., Gennaro S. Fire scenarios inside a room-and-pillar underground quarry using numerical modeling to define emergency plans // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 7, article 4607. DOI: 10.3390/app13074607.
6. Попов М. Д., Кормщицов Д. С., Семин М. А., Левин Л. Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 10. — С. 24–32. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.
7. Копин С. В., Зырянов И. В. Адаптация объемных моделей вентиляционных сетей подземных рудников для задач математического моделирования при использовании аналитического комплекса «АэроСеть» // Горная промышленность. — 2025. — № 6. — С. 82–87. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-82-87.
8. Du T., Li P., Wei H., Yang D. On the backlayering length of the buoyant smoke in inclined tunnel fires under natural ventilation // Case Studies in Thermal Engineering. 2022, vol. 39, article 102455. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102455.
9. Жихарев С. Я., Цыганков В. Д., Родионов В. А., Исаевич А. Г. Оптимизация процессов пылеподавления при ведении подземных горных работ на основе данных натуральных экспериментов и моделирования в программе ANSYS Fluent // Горный журнал. — 2023. — № 11. — С. 70–75. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.
10. 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.
11. 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.
12. Haghghat A., Luxbacher K. Tenability analysis for improvement of firefighters' performance in a methane fire event at a coal mine working face // Journal of Fire Sciences. 2018, vol. 36, no. 3, pp. 256–274. DOI: 10.1177/0734904118767066.
13. 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.
14. Yuan L., Mainiero R. J., Rowland J. H., Thomas R. A., Smith A. C. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014, vol. 30, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.05.001.
15. Tan P., Zhang C., Xia J., Fang Q.-Y., Chen G. Estimation of higher heating value of coal based on proximate analysis using support vector regression // Fuel Processing Technology. 2015, vol. 138, pp. 298–304. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.06.013.
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. Chen F., Leong J. C. Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires // Applied Mathematical Modelling. 2011, vol. 35, no. 9, pp. 4554–4566. DOI: 10.1016/j.apm.2011.03.033.

18. Zhang H., Dai F., Miao B., Wu Z., Ou J. Thermal characteristics of multiple blockages with various sizes in longitudinal ventilated tunnel fire // *Fire*. 2024, vol. 7, no. 8, article 269. DOI: 10.3390/fire7080269.
19. 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.
20. Dehghani P., Chaudhari D. M., Di Domizio M. J., Floyd J. E. Toward grid-independent modeling of natural convection with fire dynamics simulator // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025, vol. 250, article 127190. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127190.
21. Сидоренко А. А., Дмитриев П. Н., Алексеев В. Ю., Сидоренко С. А. Совершенствование технологических схем обработки склонных к самовозгоранию пластов угля, опасных по горным ударам // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 949–961.
22. Petrov A. Mathematical method of rational placement of gas fire sensors // *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 20, article 8349. DOI: 10.3390/s23208349. **PLoS**

REFERENCES

- Kabanov E. I. Analysis of accidents risk in coal mines taking into account human factor. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 48–54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.
- Bosikov I. I., Klyuev R. V., Aimbetova I. O., Makhosheva S. A. Assessment and analysis of aerodynamic parameters of air flows for effective selection of air supply schemes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 397–405. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.
- Bosikov I. I., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.
- Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X., Liu F. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 121, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.
- Nematollahi Sarvestani A., Oreste P., Gennaro S. Fire scenarios inside a room-and-pillar underground quarry using numerical modeling to define emergency plans. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 7, article 4607. DOI: 10.3390/app13074607.
- Popov M. D., Kormshchikov D. S., Semin M. A., Levin L. Yu. Calculation of air flows stability in the mine workings by the factor of thermal depression in the analytical complex «Aeroset». *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 10, pp. 24–32. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.
- Kopin S. V., Zyryanov I. V. Adaptation of 3D models of underground mine ventilation systems for mathematical modelling using the AeroSet analytical software application. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 6, pp. 82–87. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-82-87.
- Du T., Li P., Wei H., Yang D. On the backlayering length of the buoyant smoke in inclined tunnel fires under natural ventilation. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022, vol. 39, article 102455. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102455.
- Zhikharev S. Ya., Tsygankov V. D., Rodionov V. A., Isaevich A. G. Optimization of dust suppression processes during underground mining based on full-scale experimentation and ANSYS Fluent simulation. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 11, pp. 70–75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.
- 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.
- 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.
- Haghighat A., Luxbacher K. Tenability analysis for improvement of firefighters' performance in a methane fire event at a coal mine working face. *Journal of Fire Sciences*. 2018, vol. 36, no. 3, pp. 256–274. DOI: 10.1177/0734904118767066.
- 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.

14. Yuan L., Mainiero R. J., Rowland J. H., Thomas R. A., Smith A. C. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014, vol. 30, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.05.001.

15. Tan P., Zhang C., Xia J., Fang Q.-Y., Chen G. Estimation of higher heating value of coal based on proximate analysis using support vector regression. *Fuel Processing Technology*. 2015, vol. 138, pp. 298–304. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.06.013.

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. Chen F., Leong J. C. Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires. *Applied Mathematical Modelling*. 2011, vol. 35, no. 9, pp. 4554–4566. DOI: 10.1016/j.apm.2011.03.033.

18. Zhang H., Dai F., Miao B., Wu Z., Ou J. Thermal characteristics of multiple blockages with various sizes in longitudinal ventilated tunnel fire. *Fire*. 2024, vol. 7, no. 8, article 269. DOI: 10.3390/fire7080269.

19. 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.

20. Dehghani P., Chaudhari D. M., Di Domizio M. J., Floyd J. E. Toward grid-independent modeling of natural convection with fire dynamics simulator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025, vol. 250, article 127190. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127190.

21. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Alekseev V. Yu., Sidorenko S. A. Improvement of technological schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rock bumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 949–961. [In Russ].

22. Petrov A. Mathematical method of rational placement of gas fire sensors. *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 20, article 8349. DOI: 10.3390/s23208349.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоткин Илия Олегович¹ — аспирант,

e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0004-2399-480X,

Скопинцева Ольга Васильевна¹ — д-р техн. наук,

профессор, профессор, e-mail: skopintseva54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

Баловцев Сергей Владимирович¹ — д-р техн. наук,

доцент, профессор, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

¹ Университет науки и технологий МИСИС.

Для контактов: Федоткин И.О., e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.O. Fedotkin¹, Graduate Student, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0004-2399-480X,

O.V. Skopintseva¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,

e-mail: skopintseva54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

S.V. Balovtsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Professor, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

¹ University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: I.O. Fedotkin, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com.

Получена редакцией 22.11.2025; получена после рецензии 29.12.2025; принята к печати 10.03.2026.

Received by the editors 22.11.2025; received after the review 29.12.2025; accepted for printing 10.03.2026.

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В МАССИВЕ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

(2025, № 11, СБ 27, 16 с.)

*Вильмис А.Л.*¹ — д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: vilmisal@mgri.ru, ORCID ID: 0009-0002-4057-0967,
Кадыргулов Р.Р. — главный инженер, АО «Серебро Магадана», e-mail: krr22@mail.ru,
*Боровков Ю.А.*¹ — д-р техн. наук, профессор, профессор, e-mail: bua_51@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0314-067X,
Франтов А.Е. — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН, член научного совета РАН
по проблемам народохозяйственного использования взрывов, e-mail: aef1948@gmail.com,
*Стадник Д.А.*¹ — д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: stadnikda@mgri.ru, ORCID ID: 0000-0003-1271-6762,
¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения разубоживания руды при добыче тонких жильных месторождений в условиях многолетней мерзлоты. Цель работы — обоснование параметров конструкции зарядов для предварительного контурного взрывания, обеспечивающих направленное трещинообразование в многолетнемерзлых породах. Методы исследования включают аналитический анализ процессов распространения взрывных волн и деформирования горного массива, а также оценку влияния температуры на прочностные свойства пород. В результате установлено, что давление на стенку скважины при взрыве рассредоточенного заряда типа «гирлянда» уменьшается по гиперболическому закону с увеличением длины воздушного промежутка между патронами. Получены расчетные зависимости для определения радиуса зоны сжатия и оптимального расстояния между контурными шпурами при использовании шланговых зарядов и зарядов типа «гирлянда». Показано, что применение компенсационных холостых шпуров позволяет в 1,5 раза уменьшить расстояние между зарядами при сохранении эффективности направленного раскола. Научная новизна заключается в установлении аналитических зависимостей для параметров контурного взрывания с учетом температуры многолетнемерзлых пород. Главный вывод: наиболее эффективной для снижения разубоживания является технология предварительного трещинообразования с использованием шлангового заряда и компенсационного холостого шпура.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, контурное взрывание, направленное трещинообразование, взрывная волна, шланговый заряд, заряд типа гирлянда, разубоживание руды, напряжение в массиве.

INFLUENCE OF BLAST WAVES ON THE CRACK FORMATION PROCESS IN THE PERMAFROST ROCK MASS

*A.L. Vilms*¹, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Chair, ORCID ID: 0009-0002-4057-0967,
R.R. Kadyrkulov, Chief Engineer, JSC Serebro Magadana, 685007, Magadan, Russia, e-mail: krr22@mail.ru,
*Yu. A. Borovkov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, ORCID ID: 0000-0002-0314-067X,
A.E. Frantov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of the national economic use of blasts,
*D.A. Stadnik*¹, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Chair, ORCID ID: 0000-0003-1271-6762,
¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), 117997, Moscow, Russia.

The relevance of the study is driven by the need to reduce ore dilution during the mining of thin vein deposits in permafrost conditions. The aim of the work is to substantiate the design parameters of charges for preliminary contour blasting, ensuring directed crack formation in permafrost rocks. Research methods include analytical analysis of blast wave propagation processes and rock mass deformation, as well as an assessment of the influence of temperature on the strength properties of rocks. As a result, it was found that the pressure on the borehole wall during the explosion of a dispersed “garland” type charge decreases hyperbolically with an increase in the length of the air gap between the cartridges. Calculation dependences were obtained to determine the radius of the compression zone and the optimal distance between contour boreholes when using hose charges and “garland” type charges. It is shown that the use of compensation uncharged (relief) boreholes makes it possible to reduce the distance between charges by 1.5 times while maintaining the efficiency of directional splitting. The scientific novelty lies in the establishment of analytical dependencies for contour blasting parameters, taking into account the temperature of permafrost rocks. The main conclusion is that the most effective technology for reducing dilution is preliminary fracture formation using a hose charge and a compensation relief borehole.

Key words: permafrost rocks, smooth blasting, controlled fracture, blast wave, hose charge, decked charge, ore dilution, rock stress.