



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

УДК 622.4



Параметризация модели вентиляционной сети при анализе аварийных режимов проветривания систем горных выработок

М. О. Пересторонин   , О. С. Паршаков  , М. Д. Попов  

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация
 per.maks1m.97@gmail.com

Аннотация

Численное моделирование развития рудничных пожаров и взрывов является важным этапом в процессе разработки технических решений и мероприятий по повышению безопасности персонала, задействованного на подземных работах. От корректности результатов моделирования зависит, насколько принятые решения будут эффективны в случае возникновения реальной аварийной ситуации. В связи с этим должно уделять каждой стадии моделирования, и в особенности начальной – стадии параметризации модели. В настоящем исследовании сформулирован общий принцип определения параметров моделей рудничных пожаров и взрывов для оценки их развития при помощи аналитического комплекса «АэроСеть». Такими параметрами в случае пожара являются тепло- и газовыделения, а в случае взрыва – избыточное давление на фронте ударной волны в очаге взрыва. Установлено, что при моделировании пожара целесообразно использовать эквивалентные тепло- и газовыделения, определяемые содержанием горючих компонентов в источнике горения. В случае горения горнопроходческой техники данные параметры возможно рассчитать на основании технических характеристик машины. В свою очередь, при моделировании несанкционированного взрыва взрывчатых материалов избыточное давление, определяемое безразмерной длиной активного участка горения, рассчитывается с учетом массы и удельной теплоты сгорания взрывчатого вещества, а также геометрических параметров выработки. При моделировании взрыва метановоздушной смеси избыточное давление рассчитывается с учетом газоносности пород по свободным горючим газам, длины буровзрывной заходки, размеров области повышенного трещинообразования, а также нижнего предела взрываемости метана. На основании предлагаемого принципа параметризации аварийных моделей в качестве примера выполнена разработка модели развития пожара и взрыва в существующих протяженных тупиковых выработках (длиной более 1000 м), проходящих соосно друг другу на разных высотных отметках. Произведено численное моделирование различных аварийных ситуаций в выработках с учетом ведения горных работ в сложных горнотехнических условиях.

Ключевые слова

рудник, подземный пожар, взрыв, аварийная ситуация, ударная волна, моделирование, АэроСеть, параметризация, безопасность

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 20-35-90072.

Для цитирования

Perestoronin M. O., Parshakov O. S., Popov M. D. Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):150–161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes

М. О. Пересторонин   , О. С. Parshakov  , М. Д. Попов  

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation
 per.maks1m.97@gmail.com

Abstract

Digital simulation of mine fires and explosions is an important stage in the process of developing technical solutions and measures aimed at improving the safety of personnel involved in underground mining. Correct simulation results determine the effectiveness of decisions in the event of an actual emergency situation. In this regard, due attention should be paid to each stage of the simulation, and especially to the initial stage of



model parameterization. This study formulates a general principle for determining the parameters of mine fire and explosion models, in order to assess their development using the AeroNetwork analytical package. Such parameters in the event of a fire are heat and gas (afterdamp) releases. In the event of an explosion, excessive pressure at the shock front in the explosion origin. It has been established that when simulating a fire, it is advisable to use equivalent heat and gas releases determined by the content of combustible components in the combustion origin. In the event of burning mining equipment, these parameters can be calculated on the basis of the technical characteristics of a machine. Furthermore, when simulating an unauthorized explosion of explosives, the excess pressure determined by the dimensionless length of the active combustion area is calculated taking into account the weight and specific heat of an explosive, as well as the geometric parameters of a mine working. When simulating an explosion of a methane-air mixture (firedamp), the excess pressure is calculated taking into account the gas content of rocks in terms of free combustible gases, the length of a blast cut, the size of the area of increased fracturing, and the lower explosive limit of methane. Based on the proposed principle of the parameterization of emergency models, as an example, a model of fire and explosion development in existing extended dead-end workings (more than 1000 m long) passing coaxially to each other at different heights was developed. The numerical simulation of different emergency situations in workings was carried out, taking into account performing mining in difficult mining conditions.

Keywords

mine, underground fire, explosion, emergency, shock wave, simulation, AeroNetwork, parameterization, safety

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of Project No. 20-35-90072.

For citation

Perestoronin M. O., Parshakov O. S., Popov M. D. Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):150–161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

Введение

В соответствии с Законом о промышленной безопасности № Ф3-116 горнодобывающее предприятие относится к опасному производственному объекту, для которого характерен повышенный риск возникновения аварийной ситуации. Особо остро стоит вопрос безопасности людей в строящихся подземных выработках, являющихся тупиковыми и имеющими только один аварийный выход из рабочей зоны. Для таких опасных условий труда необходима разработка технических решений и мероприятий, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей и эффективное ведение горноспасательных работ. При этом в процессе их разработки целесообразно воспользоваться возможностями численного моделирования.

Согласно статистике [1, 2] наиболее разрушительными и часто встречающимися авариями являются рудничные пожары и взрывы. Поэтому в целях разработки оптимальных мер повышения безопасности шахтеров рационально и достаточно прогнозирование развития именно этих аварийных ситуаций. Однако адекватная параметризация таких моделей является задачей, отличающейся повышенной сложностью.

Так, тема моделирования развития пожара с позиции распространения продуктов горения в горных выработках освещена в трудах [3–5]. Общим недостатком представленных работ и других существующих исследований в данной области знаний является то, что аварийные тепло- и газовыделения принимаются без привязки к конкретному источнику горения. Как правило, в качестве исходных данных для моделирования используются абстрактные параметры, отражающие возможную наиболее неблагоприятную аэрологическую и теплогазодинамическую обстановку, такие как газовыделение 100 % [6, 7] или тепловы-

деление 50 МВт [8] при «сильном» пожаре. Такое упрощение обусловлено значительной трудоемкостью расчета данных параметров, поскольку их нахождение возможно при проведении полномасштабных экспериментов, как в работах [9, 10], либо при дополнительном моделировании пожара с позиции физического процесса, как это производилось в работе [11].

Оптимальным же является аналитическое определение теплогазовыделений при пожаре, учитывая конкретные горнотехнические условия, поскольку такой подход позволяет принять адекватные параметры моделирования при сравнительно небольших трудозатратах. И поскольку в настоящий момент времени такие аналитические зависимости отсутствуют, равно как отсутствует методология расчета теплогазовыделений от рудничного пожара, научные исследования в данном направлении являются весьма актуальными.

В свою очередь, говоря о рудничных взрывах, невозможно не упомянуть таких ученых, как Абинов А.Г., Васенин И.М., Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю., Плотников В.М. и др., результаты научной деятельности которых легли в основу *Методики газодинамического расчета*¹, которая на сегодняшний день применяется при определении параметров воздушных ударных волн при взрывах в шахте. В данной методике вводится понятие «активного участка горения», который представляет собой участок горной выработки, заполненный взрывоопасной смесью, и определяет начальное избыточное давление на фронте ударной

¹ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

волны в очаге взрыва. Однако ориентированность методики на аварийные расчеты не позволяет с ее помощью определить длину этого участка без фактически измеренных параметров загазованности горной выработки. Другими словами, данная методика не отвечает на вопрос, как рассчитать длину активного участка горения для условий неаварийной выработки, для которой необходима заблаговременная разработка эвакуационных и горноспасательных мероприятий. Для случая несанкционированного взрыва взрывчатых материалов (ВМ) исковую длину можно определить по аналитическим зависимостям, представленным в работе [12]. Однако для случая взрыва метановоздушной смеси (МВС) этот вопрос остается открытым и потому требует исследования.

В связи с вышесказанным в настоящей работе на примере протяженных тупиковых выработок одного из рудников России предложена методология расчета параметров модели развития рудничного пожара и взрыва в аналитическом комплексе «АэроСеть» – одном из основных инструментов по решению задач в области рудничной вентиляции и обеспечения безопасности в шахте.

Предполагается, что результаты данного исследования будут полезны не только пользователям АК «АэроСеть», осуществляющим численное моделирование развития аварий в горных выработках, но и другим специалистам в области аэрологической безопасности, имеющим дело с расчетами рудничных пожаров и взрывов.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматриваются две протяженные тупиковые выработки одного из рудников России, проходимые с целью выполнения геолого-механических исследований и организации вентиляционной сбойки между шахтными стволами. Принципиальная схема пространственного расположения выработок представлена на рис. 1.

Рассматриваемые выработки характеризуются следующими особенностями трассировки и горнотехническими условиями проходки:

– проходка выработок осуществляется одновременно в направлении ствола № 2;

– глубина залегания выработки № 1 составляет 1750–1850 м (восходящий уклон 3 в направлении ствола № 2), глубина залегания выработки № 2 – 1950 м (уклон отсутствует);

– проектная длина выработок составляет 1840 м, для выработки № 1 характерна извилистая форма трассировки, для выработки № 2 – прямолинейная с минимальным числом поворотов;

– форма поперечного сечения выработок – арочная, площадь сечения составляет 17,8 м² в проходке и 17,0 м² в свету;

– для проходки выработок используется буровзрывной комплекс, состоящий из: буровой установки Epiroc Boomer 282, ковшовой погрузочно-доставочной машины (ПДМ) Epiroc ST-1030 и автосамосвала Sandvik TH 320;

– для проветривания выработок используется система вентиляции, состоящая из: 3 наземных вентиляторов, 5 гибких воздухопроводов в стволе № 1, 2 вентиляционных камер, 4 подземных вентиляторов местного проветривания (ВМП) и 2 жестких воздухопроводов в выработках (рис. 2);

– расход воздуха, поступающего в каждую выработку, составляет 20 м³/с; производительность ВМП в вентиляционной камере – 19,3 м³/с; производительность ВМП в нише – 17,2 м³/с; расход воздуха в забое – 15,1 м³/с;

– средняя температура нетронутого массива горных пород, окружающего выработку № 1, составляет 44,5 °С, выработку № 2 – 46,6 °С;

– при температуре наружного воздуха 21,0 °С в результате гидростатического сжатия, трения и теплообмена в выработки № 1 и № 2 поступает воздух с температурой 33,3 и 34,4 °С соответственно.

Параметризация модели развития пожара

Наиболее опасным эндогенным пожаром является пожар, вызванный возгоранием технологического транспорта, поскольку такой пожар характеризуется быстротечным развитием и сопровождается значительными тепло- и газовыделениями. В связи с этим для прогнозирования аварийной аэрогазодинамической обстановки в выработках целесообразно рассмотреть возгорания техники, содержащей максимальную пожарную нагрузку.

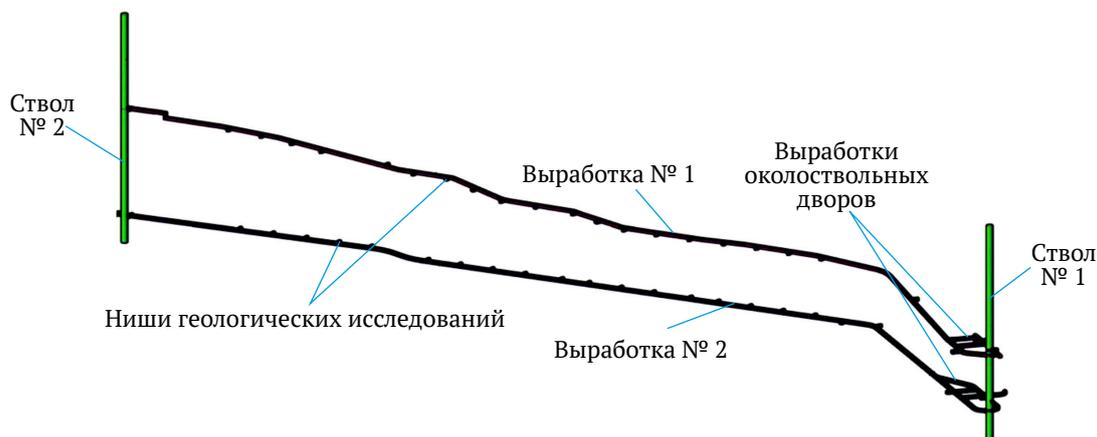


Рис. 1. Принципиальная схема пространственного расположения выработок

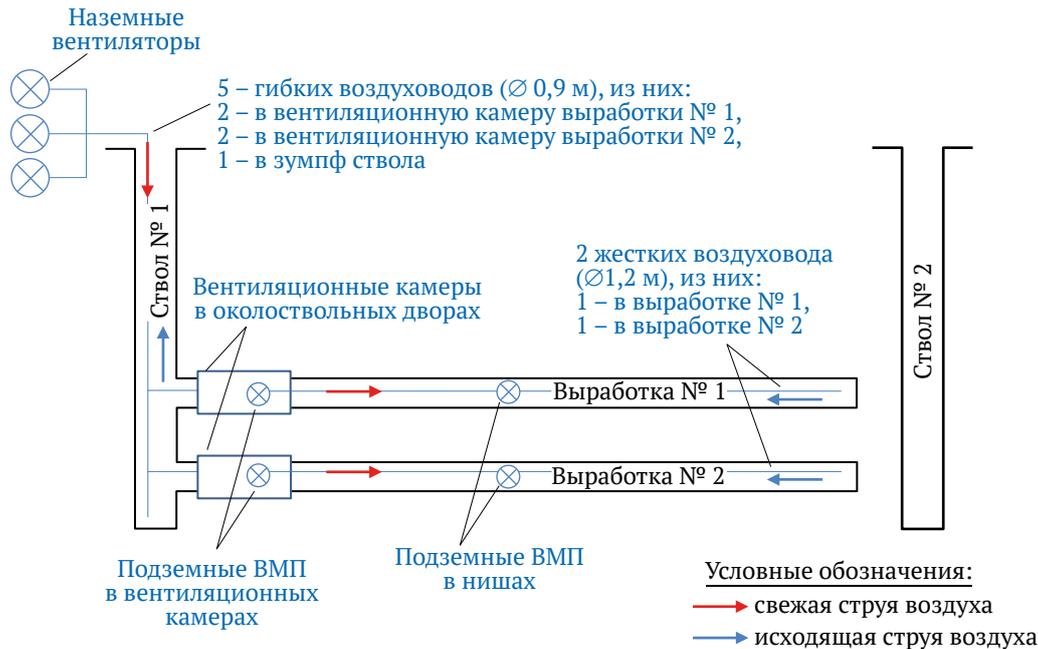


Рис. 2. Принципиальная схема проветривания выработок

Основную пожарную нагрузку машины составляют топливо, масло и резина [13]. Содержание прочих горючих компонентов незначительно, поэтому их влиянием на развитие пожара можно пренебречь. Приблизительно пожарную нагрузку машины можно определить по ее техническому паспорту. Так, объем топливного бака отражает содержание топлива, объем гидравлической системы – содержание масла, а типоразмер колесных покрышек – содержание резины.

Ключевыми параметрами модели развития пожара в горных выработках являются удельные тепло- и газовыделения. Данные параметры являются переменными во времени, поскольку пожар протекает в несколько стадий с разной интенсивностью горения [14]. Для упрощения моделирования целесообразно задаться их эквивалентными значениями на протяжении всех стадий пожара (рис. 3).

Для расчета максимальных тепловыделений, кВт, от горения определенного горючего компонента в некоторый момент времени можно воспользоваться известной формулой [15]:

$$W_i = \psi_i Q_i \eta, \tag{1}$$

где ψ_i – массовая скорость выгорания материала с пожарной нагрузки в данный момент времени, кг/с ($\psi_i = \psi_{spec i} S_i$, где $\psi_{spec i}$ – удельная скорость выгорания материала, кг/(с·м²), S_i – площадь горения в данный момент времени, м²); Q_i – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг; η – коэффициент полноты горения (принимается равным 0,85 в соответствии с [15]).

При этом время, с, выгорания горючей нагрузки определяется по формуле:

$$t_{spec i} = \frac{m_i \eta}{\psi_{spec i} S_i}, \tag{2}$$

где m_i – масса горючего компонента, кг.

Для выражения (2) в качестве площади горения предлагается принимать площадь поверхности сферы, в которую вписана вся масса горючей нагрузки для каждого компонента. Тогда эквивалентом тепловыделений, кВт, от горящей техники на протяжении всех стадий пожара будет являться некоторое среднее значение, определяемое суммированием средних тепловыделений от каждого из компонентов:

$$W_{spec} = \sum_i W_{spec i} \tag{3}$$

При этом среднее значение тепловыделений, кВт, от каждого из компонентов можно определить исходя из максимального времени горения машины t_{max} , которое соответствует времени полного выгорания последнего горящего компонента:

$$W_{spec i} = \frac{m_i \eta Q_i}{t_{max}} \tag{4}$$

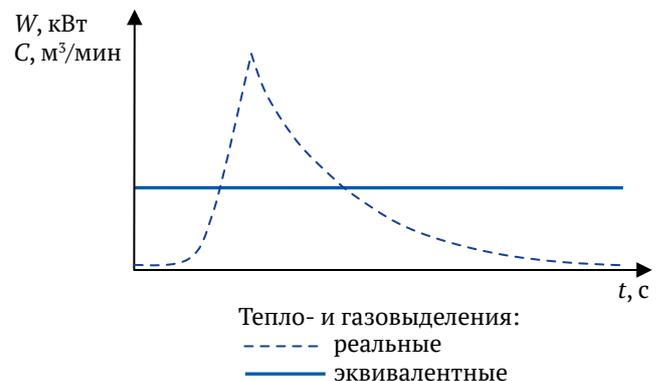


Рис. 3. Принципиальный вид эквивалентных тепло- и газовыделений при горении техники

Таблица 1

Тепловыделения от горения автосамосвала

Машина	Компонент	Масса, кг	Максимальные тепловыделения, МВт	Время выгорания, мин	Эквивалентные тепловыделения, МВт
Sandvik TH 320	топливо	283,0	4,32	39,5	1,58
	масло	340,2	4,54	44,3	1,87
	резина	278,0	1,22	108,0	1,22
	время горения машины и мощность пожара:			108,0	4,67

В условиях исследуемых выработок потенциальными источниками пожара значительной мощности являются горно-выемочная техника – буровая установка Epiroc Boomer 282, ПДМ Epiroc ST-1030, и автосамосвал Sandvik TH 320. Сравнение технических параметров показывает, что наибольшую опасность при горении несет автосамосвал Sandvik TH 320, поскольку он обладает максимальной пожарной нагрузкой. В связи с этим расчет удельных тепло- и газовойделений целесообразно производить только для данной машины.

Результаты расчета эквивалентных тепловыделений при горении автосамосвала Sandvik TH 320 представлены в табл. 1.

Согласно результатам расчета время горения автосамосвала Sandvik TH 320 составит 108,0 мин. При этом средние тепловыделения будут равны 4,67 МВт.

Для расчета удельных газовойделений необходимо знать удельный объем продуктов сгорания при горении определенного компонента техники и состав горючей массы.

Согласно Справочнику руководителя тушения пожара [15] удельный объем продуктов сгорания при горении дизельного топлива, масла, резины составляет 11,95, 11,86, 10,79 м³/кг соответственно. При этом основной состав горючей массы, выделяющейся при сгорании дизельного топлива, масла, резины [16], имеет вид:

– дизель – 86,3 % C^G, 13,3 % H^G, 0,3 % S^G, 0,1 % (O^G + N^G);

– масло – 86,5 % C^G, 12,6 % H^G, 0,4 % S^G, 0,5 % (O^G + N^G);

– резина – 85,5 % C^G, 11,8 % H^G, 2,0 % S^G, 0,7 % (O^G + N^G).

Таким образом, ключевыми компонентами в продуктах сгорания рассматриваемых материалов являются соединения углерода. При этом при пожаре в значительной мере будет происходить выделение только углекислого газа CO₂, в то время как угарный газ CO, являясь побочным продуктом реакции горения, будет существенно выделяться только при недостатке кислорода.

Для упрощения решения задачи аварийного газораспределения предполагается, что содержания кислорода в воздухе, поступающем к очагу пожара, достаточно для нормального протекания реакции

горения, в результате чего содержание угарного газа CO в продуктах горения незначительно. Тогда в качестве характерных газовойделений от пожара можно принять выделения углекислого газа CO₂, м³, которые определяются по формуле [16]:

$$V_{CO_2} = \left(0,0187 + \frac{C^G}{100} \right) V_G, \quad (5)$$

где C^G – содержание углерода C в сгораемом материале, %; V_G – общий объем продуктов горения, м³.

В таком случае удельные газовойделения, м³/мин, углекислого газа CO₂ составят:

$$v_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{t}, \quad (6)$$

где t – время горения техники, мин.

Согласно результатам расчета удельные газовойделения углекислого газа CO₂ при горении автосамосвала Sandvik TH 320 составят 72,2 м³/мин.

Параметризация модели развития взрыва

В условиях горных выработок наиболее вероятными являются взрывы, связанные с воспламенением [12]:

– взрывчатых материалов (несанкционированное возгорание);

– метановоздушной смеси;

– пыли (угольной или сульфидной).

В настоящем исследовании проведен анализ несанкционированного взрыва взрывчатых материалов и взрыва метановоздушной смеси. Исследование взрыва угольной и сульфидной пыли, присутствующей в горных выработках угольных и колчеданных шахт соответственно, в работе не осуществляется. Таким образом, в работе сделан акцент на изучение взрывов в условиях рудников, опасных по газу и не опасных по пыли.

Для оценки последствий от взрыва и разработки мероприятий по его предупреждению и ограничению зоны разрушения необходимо знать распределение давления на фронте ударной волны на некотором удалении от очага взрыва. При этом расчет параметров ударной волны на удалении от места взрыва начинается с определения давления в самом очаге.

Согласно Методике газодинамического расчета² давление в зоне взрыва ΔP_f , МПа, зависит от безразмерной длины активного участка горения \bar{L} в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 4.

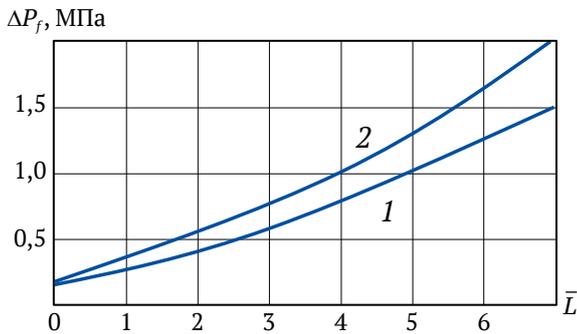


Рис. 4. Зависимость избыточного давления в зоне взрыва от безразмерной длины выработки:
1 – при взрыве метана;
2 – при взрыве метана и угольной пыли

Безразмерная длина активного участка горения \bar{L} представляет собой длину участка выработки от очага воспламенения до границы раздела «горючая смесь – воздух» и определяется по формуле³:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i P_i}{4 S_i}, \quad (7)$$

где L_i – длина i -го участка зоны взрыва, м; $i = 1, 2, \dots, n$ – фактическое число участков; S_i – площадь поперечного сечения выработки i -го участка, м²; P_i – периметр выработки, м (в случае арочной выработки $P = 3,84\sqrt{S}$).

При расчете несанкционированного взрыва взрывчатых материалов в горной выработке искомым параметр можно определить по формуле [12]:

$$\bar{L} \approx \frac{M_{es} q_{es} P}{7 S^2}, \quad (8)$$

где M_{es} – масса взрывчатого вещества, кг; q_{es} – удельная теплота сгорания взрывчатого вещества, зависящая от его типа, МДж/кг.

Таким образом, для определения давления в очаге несанкционированного взрыва ВВ достаточно знать его тип и массу.

Так, в условиях исследуемых выработок для выполнения одного цикла проходки используется гранулит АС-8 массой 180 кг – в каждой выработке. С учетом этого безразмерная длина активного участка горения составляет 7,3 м.

² Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

³ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

Сложнее выполнить расчет давления в очаге взрыва метановоздушной смеси. Это обусловлено тем, что при прогнозном расчете взрыва МВС искомую безразмерную длину активного участка горения \bar{L} , которая фактически определяется объемом горной выработки, заполненной взрывоопасной смесью, можно определить только приближенно.

Одним из оптимальных подходов определения максимального загазованного объема горной выработки, м³ является расчет, учитывающий газоносность горных пород по свободным горючим газам и их минимальную концентрацию, достаточную для возникновения взрыва:

$$V_g = \frac{g S_{sink} (L_{sink} + B) 100}{C_{low}}, \quad (9)$$

где g – газоносность горных пород по свободным горючим газам, м³/м³; S_{sink} – площадь поперечного сечения горной выработки в проходке, м²; L_{sink} – длина заходки, м; B – длина участка породного массива перед горной выработкой, с которого происходят газовыделения (зона наибольшего трещинообразования), м; C_{low} – нижний предел взрываемости метана, %.

Нижний предел взрываемости метана в нормальных условиях составляет 5 %. Однако в условиях давлений, отличающихся от нормального, необходим его пересчет по формуле [17]:

$$C_{low} = \frac{5}{k}, \quad (10)$$

где k – коэффициент пересчета объемной концентрации метана в молярную ($k = p/98070$, где p – барометрическое давление в горной выработке, Па).

Безразмерная длина активного участка горения \bar{L} в таком случае находится по формуле:

$$\bar{L} = \frac{V_g}{S_{expl}}, \quad (11)$$

где S_{expl} – площадь поперечного сечения горной выработки в свету, м².

В представленном подходе предполагается, что выделение метана в призабойное пространство выработки происходит из отбиваемого объема горных пород, а также с участка зоны опорного давления впереди забоя, который наиболее сильно подвержен трещинообразованию (рис. 5). Газовыделения из стенок, кровли и почвы выработки, обнаженных до момента взрывных работ, не учитываются ввиду их незначительности вследствие дегазации данных участков в предыдущих проходческих циклах.

Для условий рассматриваемых выработок длина буровзрывной заходки равна 2,3 м. При этом в соответствии с результатами исследования [18] зона наибольшего трещинообразования распространяется на глубину 5,3 м от забоя. При газоносности пород по свободным горючим газам 0,15 м³/м³ и нижнем пределе взрываемости метана 4,11 % (выработка № 1) и 4,02 % (выработка № 2) искомая безразмерная длина активного участка горения составит 29,1 м и 29,7 м для выработок № 1 и № 2 соответственно.

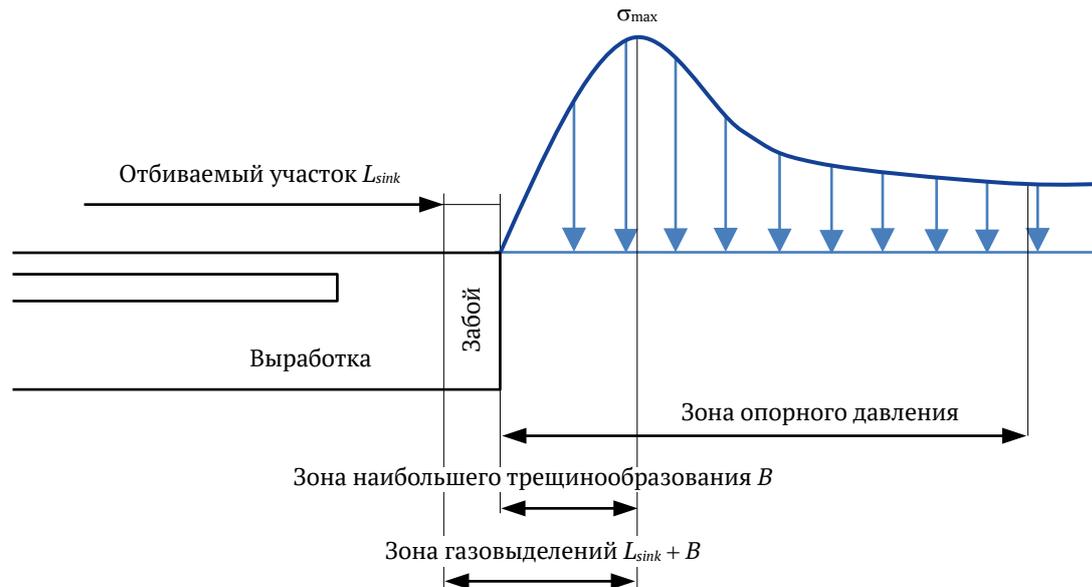


Рис. 5. Зона газовыделений

Результаты моделирования развития пожара

Разработке модели развития пожара предшествует разработка вентиляционной и теплогазодинамической моделей выработок. В АК «АэроСеть» разработка вентиляционной модели начинается с построения топологии вентиляционной сети. Затем всем выработкам задаются аэродинамические параметры (площади поперечного сечения, периметры, длины, коэффициенты шероховатости), на основании которых выполняется расчет аэродинамических сопротивлений элементов сети. После этого в модель вносятся сведения о вентиляционных сооружениях и источниках тяги, характеризующие режим их работы.

Теплогазодинамическая модель параметризуется путем активации/деактивации учета различных физических процессов, влияющих на теплогазораспределение в выработках. Для случая рассмотрения пожара в тупиковой выработке теплогазодинамический расчет должен учитывать гидростатическое сжатие воздуха, работу сил давления, теплообмен в системе «источник горения – породный массив – воздух в выработке – воздух в воздуховоде» и влияние тепловых депрессий (подробное описание математической модели тепловых и аэродинамических процессов в АК «АэроСеть» представлено в работе [19]). Задание в теплогазодинамической модели источника теплогазовыделений с расчетными параметрами (4,67 МВт, 72,2 м³/мин) позволяет выполнить расчет развития пожара с позиции определения газо- и температурораспределений в выработках с течением времени. При этом результаты моделирования напрямую зависят от места расположения источника горения.

В случае рассматриваемых тупиковых выработок отгрузка отбитой горной массы осуществляется по-

грузочно-доставочной техникой, курсирующей между забоями и шахтным стволом. Ввиду этого пожар возможен в любой части тупиковой выработки. Однако с учетом сконцентрированности горных работ именно в призабойном пространстве выработок целесообразно рассмотреть пожар в забое.

Необходимо отметить, что в случае рассматриваемой задачи принимается, что целостность воздуховода при пожаре не нарушается ввиду его жесткого металлического исполнения и расположения очага пожара в забое. Однако при расположении пожара по длине тупиковой выработки и использовании гибкого неогнестойкого воздуховода необходимо учитывать возможное нарушение его герметичности или обрыв в результате теплового воздействия.

Результаты моделирования распределения температуры воздуха спустя 108 мин после возникновения пожара в выработке № 1 представлены на рис. 6. Дополнительно на рисунке указаны значения концентраций углекислого газа CO₂ в ключевых точках выработок.

Согласно результатам моделирования возникновения пожара в устье выработки № 1 не приведет к существенному изменению расхода воздуха в выработке № 2. При этом в очаге пожара температура воздуха достигнет 339,8 °С, а концентрация углекислого газа CO₂ составит 8,43 %. Стоит отметить, что пожар в устье выработки № 1 не приведет к возникновению в выработке № 2 атмосферы, неблагоприятной по составу и температуре. Это обусловлено тем, что разогретые продукты горения, имеющие меньшую плотность в сравнении с воздухом в стволе, будут удаляться в направлении к дневной поверхности. Кроме этого, загазованности выработки № 2 будет препятствовать работа поверхностных вентиляторов, работающих на нагнетание, и вытесняющих дым из выработки № 1 наружу.

Распределение давления на фронте ударной волны при взрыве в забое выработки № 1 ВМ и МВС представлено на рис. 7. В соответствии с *Методикой газодинамического расчета*⁴ в качестве критерия опасности воздействия ударной волны на людей, находящихся в шахте, принято избыточное давление на фронте волны, равное 0,006 МПа.

⁴ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

Согласно результатам моделирования при несанкционированном взрыве ВМ в забое выработки № 1 избыточное давление в очаге взрыва составит 0,25 МПа. При этом зона опасного воздействия ударной волны распространится на расстояние 560 м, что соответствует 30 % от общей протяженности тупиковой выработки (1840 м). При взрыве МВС в забое выработки № 1 избыточное давление в очаге взрыва составит 0,6 МПа, а зона опасного воздействия ударной волны распространится на расстоянии 643 м, что соответствует 35 % от общей протяженности тупиковой выработки. Схожие результаты моделирования

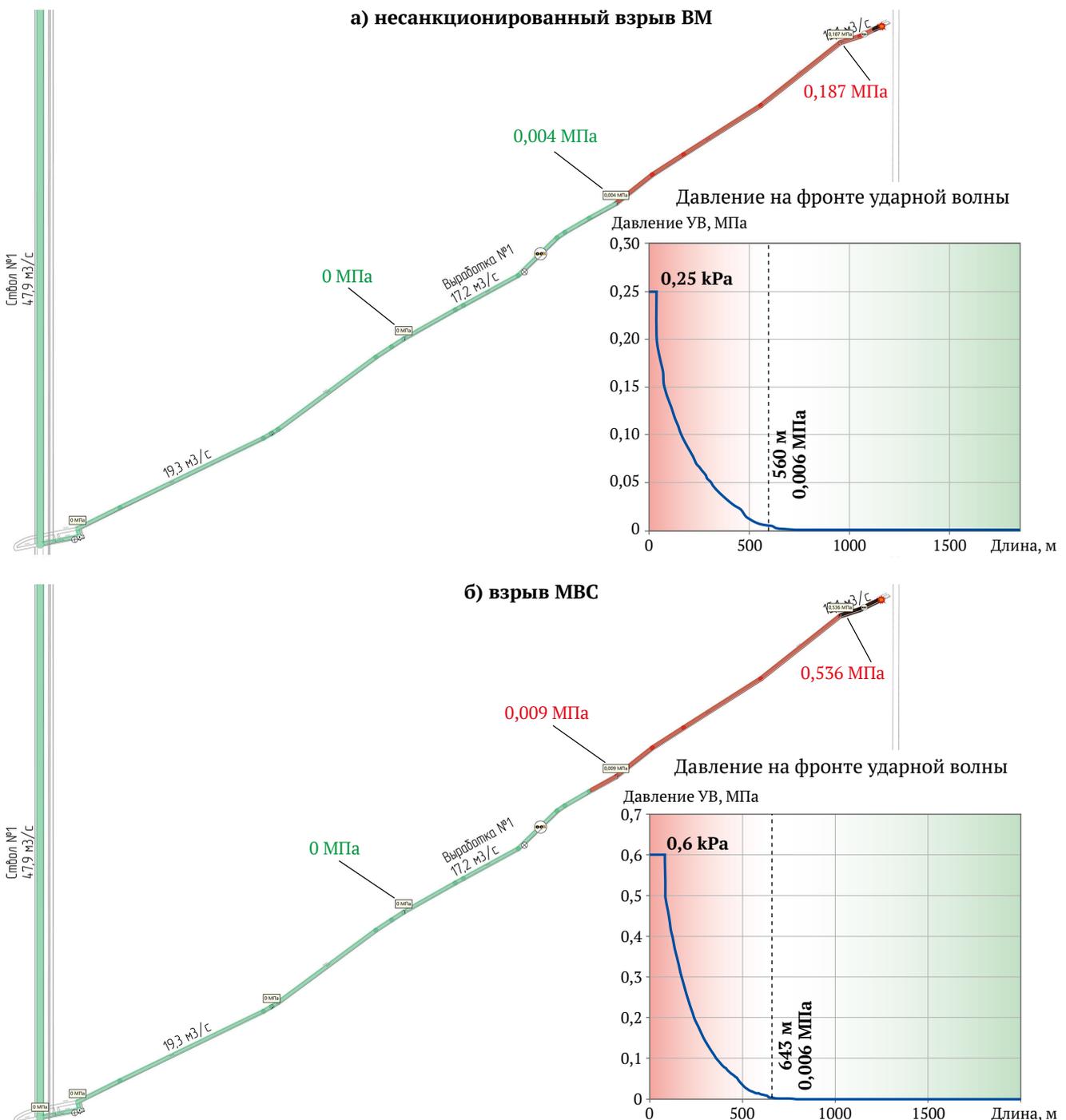


Рис. 7. Распределение давления на фронте ударной волны при взрыве в забое выработки № 1:
а – взрыв ВМ; б – взрыв МВС



получены при рассмотрении взрыва в устье выработки № 2 с тем только отличием, что в данном случае зона опасного воздействия ударной волны будет иметь больший радиус распространения по причине прямолинейности выработки № 2. Таким образом, в условиях рассматриваемых выработок наибольшую опасность несет взрыв МВС.

Заключение

В настоящем исследовании сформулирован общий принцип определения параметров моделей рудничных пожаров и взрывов для оценки их развития при помощи АК «АэроСеть». Согласно этому принципу параметризация модели развития пожара заключается в определении тепло- и газовой выделений от источника горения с учетом следующих особенностей:

– для прогнозирования возможного наиболее неблагоприятного состояния рудничной атмосферы при возникновении шахтного экзогенного пожара целесообразно рассмотрение возгорания только техники с максимальной пожарной нагрузкой;

– основную пожарную нагрузку техники составляют топливо, масло и резина, поэтому приблизительно пожарную нагрузку можно определить на основании технических характеристик машины, таких как объем топливного бака, объем гидравлической системы, типоразмер колесных покрышек;

– в качестве тепло- и газовой выделений от горячей техники целесообразно принимать эквивалентные значения, определяемые пересчетом по отдельным горючим компонентам;

– с учетом химического состава пожарной нагрузки для оценки ядовитости рудничной атмосферы при пожаре достаточно рассмотреть распространение углекислого газа CO_2 .

В свою очередь, параметризация модели развития взрыва заключается в определении избыточного давления на фронте ударной волны в очаге взрыва с учетом следующих особенностей:

– избыточное давление на фронте ударной волны в очаге взрыва определяется в зависимости от безразмерной длины активного участка горения \bar{L} ;

– для случая несанкционированного взрыва МВ параметр \bar{L} определяется массой и удельной теплотой сгорания взрывчатого вещества, а также геометрическими параметрами выработки;

– для случая взрыва МВС параметр \bar{L} определяется с учетом газоносности пород по свободным горючим газам, длины буровзрывной заходки, размеров области повышенного трещинообразования, а также нижнего предела взрываемости метана, пересчитываемого по фактическому давлению в горной выработке.

Список литературы

1. Пахомов В.П., Рудакова Л.В. Техногенные катастрофы горнопромышленного характера. *Экономика региона*. 2006;(2):23–36.
2. Ремизов А.В., Хобта А.А. Причины возникновения аварийных ситуаций в угольных шахтах и возможности их предотвращения. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2016;(1):14–16. URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgiu/vestnik15.pdf>
3. Brake D.J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. In: Chalmers D. (ed.) *The Australian Mine Ventilation Conference*. Adelaide, South Australia, 1–3 July 2013. The AusIMM; 2013. Pp. 265–276. URL: https://ventsim.com/wp-content/uploads/2019/04/Fire_Modelling_in_Underground_Mines_using_Ventsim_VentFIRE.pdf
4. De Rosa M.I. *Analysis of mine fires for all US metal/non-metal mining categories, 1990–2001*. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2004. URL: <https://www.cdc.gov/NIOSH/Mining/UserFiles/works/pdfs/2005-105.pdf>
5. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках. *Горная промышленность*. 2007;(6):20–23. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/866-programma-rascheta-ventilyatsionnykh-rezhimov-v-shakhtakh-i-rudnikakh>
6. Lönnemark A., Blomqvist P. *Emissions from tyre fires*. Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute; 2005.
7. Лискова М.Ю., Наумов И.С. Моделирование аварийных ситуаций в шахтах и рудниках. *Научные исследования и инновации*. 2013;7(1–4):78–81.
8. Шалимов А.В. Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2011;(6):84–92. (Перев. вер.: Shalimov A.V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Journal of Mining Science*. 2011;47(6):807–813. <https://doi.org/10.1134/S106273914706013X>)
9. Hansen R., Ingason H. *Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine*. Research report. Västerås, Sweden: Mälardalen University; 2013.
10. Hansen R. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Fire Safety Journal*. 2015;71:194–216. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.008>
11. Данилов А.И., Маслак В.А., Вагин А.В., Сиваков И.А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена. *Пожаровзрывобезопасность*. 2017;26(10):27–35. <https://doi.org/10.18322/pvb.2017.26.10.27-35>



12. Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н. и др. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. В: *Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр»; 2011. 312 с.*

13. Смолин И. М., Полетаев Н. Л., Гордиенко Д. М. и др. *Пособие по применению СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»*. М.: ВНИИПО; 2014. 147 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c84/4293768102.pdf>

14. Карсаков О. Г. К вопросу обоснования критического времени пожара на начальной стадии. *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015;4(1–1):330–332.

15. Иванников В. П., Ключ П. П. *Справочник руководителя тушения пожара*. М.: Стройиздат; 1987. 288 с.

16. Быстрицкий Г. Ф., Гасангаджиев Г. Г., Кожиченков В. С. *Общая энергетика. Основное оборудование*. Учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт; 2018. 416 с. URL: https://mx3.urait.ru/uploads/pdf_review/90FAE97C-FD7D-41FC-ACD5-6E038A39261C.pdf

17. Колесниченко И. Е., Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Черечукин В. Г. Зависимость объемного концентрационного предела взрываемости метана от физических параметров атмосферы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S7):174–181.

18. Черданцев Н. В., Зыков В. С. Решение задачи определения параметров опорного давления в окрестности пластовой выработки на основе вычислительного эксперимента. *Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли*. 2017;(3):16–30. URL: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/arhiv/vypusk-3-2017/reshenie-zadachi-opredeleniya-parametrov-opornogo-davleniya-v-okrestnosti-plastovoy-vyrabotki-na-osnove-vychislitelnogo-eksperimenta/>

19. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):154–161. (Перев. вер.: Levin L. Y., Semin M. A., Zaitsev A. V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):371–378. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020203>)

References

1. Pakhomov V. P., Rudakova L. V. Catastrophes formed by a technical reaction of the character of mining industries. *Economy of Regions*. 2006;(2):23–36. (In Russ.)

2. Remizov A. V., Hobta A. A. The causes of emergency situations in coal mines and the possibilities of their prevention. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2016;(1):14–16 (In Russ.) URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgu/vestnik15.pdf>

3. Brake D. J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. In: Chalmers D. (ed.) *The Australian Mine Ventilation Conference*. Adelaide, South Australia, 1–3 July 2013. The AusIMM; 2013. Pp. 265–276. URL: https://ventsim.com/wp-content/uploads/2019/04/Fire_Modelling_in_Underground_Mines_using_Ventsim_VentFIRE.pdf

4. De Rosa M. I. *Analysis of mine fires for all US metal/non-metal mining categories, 1990–2001*. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2004. URL: <https://www.cdc.gov/NIOSH/Mining/UserFiles/works/pdfs/2005-105.pdf>

5. Paleyev D., Lukashov O. Software complex “Mining Aerology (Ventilation)”. *Russian Mining Industry*. 2007;(6):20–23. (In Russ.) URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/866-programma-rascheta-ventilyatsionnykh-rezhimov-v-shakhtakh-i-rudnikakh>

6. Lönnemark A., Blomqvist P. *Emissions from tyre fires*. Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute; 2005.

7. Liskova M. Yu., Naumov I. S. Design of emergency situations in mines. *Nauchnyye Issledovaniya i Innovatsii*. 2013;7(1–4):78–81. (In Russ.)

8. Shalimov A. V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Journal of Mining Science*. 2011;47(6):807–813. <https://doi.org/10.1134/S106273914706013X> (Orig. ver.: Shalimov A. V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2011;(6):84–92. (In Russ.))

9. Hansen R., Ingason H. *Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine*. Research report. Västerås, Sweden: Mälardalen University; 2013.

10. Hansen R. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Fire Safety Journal*. 2015;71:194–216. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.008>

11. Danilov A. I., Maslak V. A., Vagin A. V., Sivakov I. A. Numerical simulation of a subway car fire. *Fire and Explosion Safety*. 2017;26(10):27–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18322/pvb.2017.26.10.27-35>

12. Paleev D. Yu., Lukashov O. Yu., Kosterenko V. N. et al. Shock waves during explosions in coal mines. In: *Mining Engineer’s Library. Volume 6 “Industrial Safety”. Part 3*. Moscow: Gornoe Delo Publ, Cimmerian Center LLC; 2011. 312 p. (In Russ.)



13. Smolin I.M., Poletayev N.L., Gordienko D.M. et al. *Manual for the application of SP 12.13130.2009 "Determining the categories of premises, buildings, and outdoor installations in terms of explosion and fire hazard"*. Moscow: VNIPO Publ.; 2014. 147 p. (In Russ.) URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c84/4293768102.pdf>
14. Karsakov O.G. On the problem of justifying the critical time of a fire at the initial stage. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*. 2015;4(1–1):330–332. (In Russ.)
15. Ivannikov V.P., Klyus P.P. *Fire extinguishing manager's handbook*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1987. 288 p. (In Russ.)
16. Bystritsky G.F., Gasangadzhiev G.G., Kozhichenkov V.S. *General power engineering. Core equipment*. Textbook. 2nd update. Moscow: Yurait Publ. House; 2018. 416 p. (In Russ.) URL: https://mx3.urait.ru/uploads/pdf_review/90FAE97C-FD7D-41FC-ACD5-6E038A39261C.pdf
17. Kolesnitchenko I.E., Kolesnitchenko E.A., Artemiev V.B., Icheretchukin V.G. Dependence of volumetrically concentration limit of methane blasting on physical parameters of the atmosphere. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S7):174–181. (In Russ.)
18. Cherdancev N.V., Zykov V.S. The solution to a problem of in-seam working areas abutment pressure parameters determination based on the simulation experiment. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2017;(3):16–30. (In Russ.) URL: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/arhiv/vypusk-3-2017/reshenie-zadachi-opredeleniya-parametrov-opornogo-davleniya-v-okrestnosti-plastovoy-vyrabotki-na-osnove-vychislitel'nogo-eksperimenta/>
19. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):371–378. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020203> (Orig. ver.: Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2014;(2):154–161. (In Russ.))

Информация об авторах

Максим Олегович Пересторонин – аспирант, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0003-0203-9304](https://orcid.org/0009-0003-0203-9304), Scopus ID [57701516700](https://scopus.com/authorid/57701516700); e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Олег Сергеевич Паршаков – кандидат технических наук, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5545-442X](https://orcid.org/0000-0001-5545-442X), Scopus ID [57202379375](https://scopus.com/authorid/57202379375); e-mail olegparshakov@gmail.com

Максим Дмитриевич Попов – аспирант, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-6388-608X](https://orcid.org/0009-0007-6388-608X), Scopus ID [57208722129](https://scopus.com/authorid/57208722129); e-mail maxpan09@gmail.com

Information about the authors

Maxim O. Perestoronin – Postgraduate Student, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0003-0203-9304](https://orcid.org/0009-0003-0203-9304), Scopus ID [57701516700](https://scopus.com/authorid/57701516700); e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Oleg S. Parshakov – Cand. Sci. (Eng.), Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5545-442X](https://orcid.org/0000-0001-5545-442X), Scopus ID [57202379375](https://scopus.com/authorid/57202379375); e-mail olegparshakov@gmail.com

Maxim D. Popov – Postgraduate Student, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0007-6388-608X](https://orcid.org/0009-0007-6388-608X), Scopus ID [57208722129](https://scopus.com/authorid/57208722129); e-mail maxpan09@gmail.com

Поступила в редакцию 06.10.2022
Поступила после рецензирования 19.01.2023
Принята к публикации 27.01.2023

Received 06.10.2022
Revised 19.01.2023
Accepted 27.01.2023