

УДК 622.4

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2024

**Валидация модели тепломассопереноса в атмосфере горизонтальной горной выработки при наличии интенсивного источника нагрева****Л.Ю. Левин, М.А. Семин, М.Д. Попов, С.Я. Жихарев**

Горный институт УрО РАН (Российская Федерация, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

**Validation of the Heat and Mass Transfer Model in the Atmosphere of a Horizontal Mine Working in the Presence of an Intense Heating Source****Lev Yu. Levin, Mikhail A. Semin, Maksim D. Popov, Sergei Ya. Zhikharev**

Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 01.02.2024. Принята / Accepted: 26.07.2024. Опубликовано / Published: 30.08.2024

**Ключевые слова:**

рудничная вентиляция, экзогенный пожар, горная выработка, лабораторный эксперимент, валидация модели, турбулентное течение, численное моделирование.

Описан разработанный авторами лабораторный стенд, представляющий собой уменьшенную физическую модель горной выработки и предназначенный для исследования закономерностей тепломассопереноса в горизонтальных и наклонных горных выработках в условиях наличия интенсивных источников тепловыделения (экзогенных пожаров). Проведено обоснование параметров стенда, исходя из масштабирования по критерию подобия Фруда. Проведенные экспериментальные измерения параметров воздушного потока на стенде в условиях действия интенсивного источника тепловыделения использованы для валидации математической модели тепломассопереноса в горной выработке. Математическая модель основана на усредненных по Рейнольдсу уравнениях неразрывности, Навье – Стокса, баланса энергии, состояния идеального газа. Для замыкания системы уравнений использована модель турбулентности Realizable k-epsilon. Численная реализация модели осуществлялась в программном пакете Ansys Fluent с использованием метода конечных объемов, а также алгоритма Simple для связывания полей скорости и давления. Сравнительный анализ результатов теоретических расчетов на предложенной модели и полученных данных лабораторных экспериментов показал приемлемое соответствие как на качественном, так и на количественном уровнях. В дополнение к этому в работе проведен сравнительный анализ результатов расчета тепломассопереноса в горной выработке в рамках модели турбулентности Realizable k-epsilon модели с расчетами, выполненными в рамках двух других моделей турбулентности, основанных на усреднении характеристик воздушного потока по Рейнольдсу – SST k-omega и Reynolds stress model (RSM). Показано, что модели Realizable k-epsilon и SST k-omega в равной степени применимы для теоретического анализа процессов тепло- и массопереноса в рассматриваемом лабораторном стенде, в то время как более сложная модель RSM имеет значимые различия с данными расчетов на моделях Realizable k-epsilon и SST k-omega, а также с данными проведенного лабораторного эксперимента.

**Keywords:**

mine ventilation, exogenous fire, mine workings, laboratory experiment, model validation, turbulent flow, numerical modeling.

The paper describes a laboratory setup developed by the authors, which is a reduced physical model of a mine working and is intended to study the patterns of heat and mass transfer in horizontal and inclined mine workings in the presence of intense heating sources (exogenous fires). The parameters of the setup were substantiated based on scaling according to the Froude similarity criterion. The experimental measurements of the air flow parameters on the setup under the action of an intense heat source were used to validate the mathematical model of heat and mass transfer in a mine working. The mathematical model was based on the Reynolds-averaged continuity equations, Navier-Stokes, energy balance, and ideal gas state. The Realizable k-epsilon turbulence model was used to close the system of equations. The numerical implementation of the model was carried out in the Ansys Fluent software package using the finite volume method and the Simple algorithm for linking the velocity and pressure fields. A comparative analysis of the theoretical calculation results using the proposed model and the obtained laboratory experiment data showed acceptable agreement both at the qualitative and quantitative levels. In addition, the paper provides a comparative analysis of the heat and mass transfer calculation results in a mine working using the Realizable k-epsilon turbulence model with the calculations performed using two other turbulence models based on Reynolds averaging of air flow characteristics – SST k-omega and Reynolds stress model (RSM). It is shown that the Realizable k-epsilon and SST k-omega models are equally applicable for the theoretical analysis of heat and mass transfer processes in the laboratory setup under consideration, while the more complex RSM model has significant differences from the calculation data using the Realizable k-epsilon and SST k-omega models, as well as from the laboratory experiment data.

© **Левин Лев Юрьевич** – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: aerolog\_lev@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

© **Семин Михаил Александрович** – доктор технических наук, ученый секретарь (тел.: +007 (909) 106 20 67, e-mail: seminma@inbox.ru).

© **Попов Максим Дмитриевич** – инженер (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: maxpan09@gmail.com).

© **Жихарев Сергей Яковлевич** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: perevoloki55@mail.ru).

© **Lev Yu. Levin** (Author ID in Scopus: 56358515000, ORCID: 0000-0003-0767-9207) – Doctor in Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: aerolog\_lev@mail.ru). The contact person for correspondence.

© **Mikhail A. Semin** (Author ID in Scopus: 56462570900, ORCID: 0000-0001-5200-7931) – Doctor in Engineering, Scientific Secretary (e-mail: seminma@inbox.ru, tel.: +007 (909) 106 20 67).

© **Maksim D. Popov** (Author ID in Scopus: 57208722129) – Engineer (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: maxpan09@gmail.com).

© **Sergei Ya. Zhikharev** (Author ID in Scopus: 57202921925, ORCID: 0000-0003-4102-6066) – Doctor in Engineering, Leading Researcher (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: perevoloki55@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Валидация модели тепломассопереноса в атмосфере горизонтальной горной выработки при наличии интенсивного источника нагрева / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, М.Д. Попов, С.Я. Жихарев // Недропользование. – 2024. – Т.24, №3. – С.169–176. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.8

Please cite this article in English as:

Levin L.Yu., Semin M.A., Popov M.D., Zhikharev S.Ya. Validation of the heat and mass transfer model in the atmosphere of a horizontal mine working in the presence of an intense heating source. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol.24, no.3, pp.169-176. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.8

## Введение

В современном мире, где горнодобывающая промышленность играет ключевую роль в обеспечении энергетических и сырьевых потребностей нашей страны, вопросы обеспечения безопасности при ведении горных работ являются крайне важными. Вместе с тем решение данных вопросов становится все более трудной задачей из-за постоянного роста протяженности транспортных конвейеров и линий электропередач, увеличения количества применяемой на рудниках горной техники. Все это, во-первых, указывает на возрастание количества потенциальных источников подземных пожаров, а во-вторых, приводит к усложнению в обеспечении устойчивого проветривания горных выработок как в штатных, так и в аварийных режимах работы системы вентиляции [1].

Подземные пожары в системах горных выработок представляют собой серьезную угрозу для безопасности работников и инфраструктуры, а также для окружающей среды. Согласно [2], даже если будут приняты все разумные меры предосторожности, всегда найдутся по крайней мере несколько вероятных сценариев, которые могут привести к крупному подземному пожару в любой шахте или руднике. А потому важными направлениями исследований являются не только минимизации рисков возникновения подземных пожаров [3], но и развитие подходов и методов локализации и ликвидации последствий возгораний [4].

Подземные пожары в шахтах и рудниках бывают эндогенными и экзогенными. Эндогенные пожары возникают в результате спонтанного самовозгорания пород [5–7], в то время как экзогенные обычно вызваны неисправностями в электрооборудовании, неисправностями в работе механических элементов систем транспортировки руды (конвейеров), несоблюдением правил техники безопасности при осуществлении работ под землей и пр. [8, 9].

При разработке новых подходов и методов локализации и ликвидации экзогенных пожаров в рудниках важным аспектом является понимание закономерностей развития подземных пожаров, а также их влияния на распределение аэротермодинамических параметров воздушных потоков в сети горных выработок. Выявление такого рода закономерностей осуществляется как с использованием экспериментальных измерений параметров воздушных потоков в системах горных выработок при наличии источников тепловыделений [10–12], так и с помощью современных методов теоретического анализа. В качестве последнего используются как одномерные модели вентиляционных сетей подземных рудников [1, 13, 14], так и трехмерные модели аэротермодинамических процессов на отдельных участках вентиляционных сетей [15, 16].

В настоящее время методология моделирования подземных пожаров активно прорабатывается не только для шахт и рудников, но также и применительно к вопросам проветривания тоннелей метрополитенов и автотранспорта [17, 18]. Вместе с этим исследования развития пожаров в тоннелях имеют свою специфику и потому недостаточно подробно рассматривают ряд вопросов, актуальных в первую очередь для подземных шахт и рудников. К числу таковых можно отнести разработку оптимальных путей эвакуации горнорабочих [19–21], анализ распределенных источников теплоты при пожарах (конвейеров) [22, 23], определение возгорания в разветвленных сетях выработок по косвенным показаниям датчиков [24, 25]. Еще одной отличительной особенностью шахт и рудников является выделение горючих газов, участвующих в процессе

горения [26, 27]. Вдобавок к этому, корректный учет эффекта возвратных течений продуктов горения в разветвленных сетях горных выработок представляет собой большую сложность, чем для относительно простых вентиляционных сетей автодорожных тоннелей и тоннелей метрополитенов. Этому вопросу, в частности, посвящены исследования [13, 28, 29].

Вместе с этим закономерности распределения аэротермодинамических параметров воздуха в системах горных выработок изучены сравнительно меньше, чем в автотранспортных тоннелях и тоннелях метрополитенов. Именно применительно к тоннелям впервые определены основополагающие законы, связывающие так называемую критическую скорость воздушного потока с интенсивностью тепловыделений от источника возгорания. В работе [10] выделено два режима вариации критической скорости при изменении мощности теплового источника; показано, что критическая скорость становится константой, начиная с определенного значения тепловой мощности. В работе [11] исследовано влияние угла наклона тоннеля на критическую скорость. Основным результатом этой работы является вывод, что в диапазоне углов наклона до  $10^\circ$  можно принимать линейную зависимость критической скорости от угла наклона. В работе [12] исследовано влияние поперечного сечения тоннеля на критическую скорость. Получено, что в формулах для критической скорости в качестве характерного размера тоннеля следует принимать не высоту, а эквивалентный (гидравлический) диаметр. При этом авторы работы [30] пришли к выводу, что в качестве характерного пространственного размера наклонного тоннеля с источником возгорания следует брать более сложный комплекс  $H^{3/2}/b^{1/2}$ , включающий в себя как высоту  $H$ , так и ширину  $b$  тоннеля. Авторы работ [31, 32] исследовали закономерности изменения температуры у кровли тоннеля, тем самым уточнив данные предыдущих исследований [30, 33].

В современных исследованиях экзогенных пожаров используется большой спектр программных продуктов, предназначенных для расчета тепломассопереноса в условиях источников возгорания: MFIRE, Ventgraph, MineFIRE Pro+, VentFIRE™, Fire Dynamics Simulator, «Аэросеть» [28, 34, 35]. Авторами применяется широкий спектр возможных моделей турбулентного тепломассопереноса в потоке воздуха около источника возгорания: LES [21, 36], k-epsilon [26], SST-k-omega [37] и др. Несмотря на то, что более классической моделью расчета нестационарного характера течения воздуха в окрестности фронта пламени является модель LES, более простые двухпараметрические модели турбулентности также находят свое применение при решении инженерных задач.

Вместе с тем остается нерешенным вопрос применимости относительно простых моделей турбулентности, основанных на усреднении характеристик воздушного потока по Рейнольдсу, для определения закономерностей конвективного расслоения воздушных масс при пожарах в системах горных выработок. Наиболее простой модельной ситуацией в данном случае является возгорание в отдельно взятой горизонтальной или наклонной горной выработке. Обоснованность применения таких моделей турбулентности должна проверяться либо путем сопоставления с данными полномасштабных натуральных измерений, либо путем сравнения с данными измерений в лабораторных условиях на уменьшенных физических моделях систем горных выработок. Последний подход применен в рамках настоящего исследования, целью которого является валидация математической модели тепломассопереноса в турбулентном воздушном потоке

путем сопоставления расчетных данных с измерениями на разработанном авторами стенде, имитирующем горизонтальную горную выработку и присутствующий в ее середине локальный источник возгорания.

**Разработка стенда**

В рамках настоящего исследования разработан лабораторный стенд, представляющий собой уменьшенную модель горной выработки и предназначенный для экспериментального исследования конвективного расслоения воздушных потоков в горизонтальных и наклонных выработках вблизи интенсивного источника тепловыделения. Принципиальная схема стенда показана на рис. 1. Фотографии собранного стенда приведены на рис. 2.

Лабораторный стенд представляет собой стальной воздуховод, который практически на всем своем протяжении имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 300 × 500 мм. Исключениями являются малая область вблизи источника нагрева (в центральной области стенда), а также малая область вблизи источника тяги (в верхней части стенда), где сечение переходит от кругового профиля на выходе из вентилятора к прямоугольному профилю 300 × 500 мм.

Движение воздуха в воздуховоде обеспечивается каналным вентилятором, допускающим регулирование производительности. При этом средняя скорость воздушного потока в воздуховоде может изменяться в диапазоне от 0,5 до 3 м/с. Также в стенде предусмотрена возможность изменения угла наклона воздуховода в диапазоне от -15° до 15°, что примерно соответствует возможному диапазону углов наклона реальных горных выработок. Кроме того, в настоящей статье описаны результаты экспериментальных измерений и их сопоставление с модельными данными только при угле 0°.

В центральной части стенда установлен источник нагрева, который представляет собой каналный электрический калорифер, имеющий максимальную тепловую мощность 22 кВт. При этом мощность тепловыделений от источника нагрева допускает ступенчатое регулирование с минимальным шагом, равным 2,4 кВт. В месте установки источника нагрева поперечное сечение воздуховода также локально изменяется, что обусловлено конструктивными особенностями нагревателей.

Стенд имеет два вентиляционных окна, одно из которых расположено в верхней его части, а второе – в нижней. В рамках описываемого в этой статье исследования вентиляционные окна были герметично закрыты, а воздуховод имел две аэродинамические связи с внешней атмосферой – входное сечение в его верхней части и выходное сечение в его нижней части.

Диапазон скоростей воздушного потока и интенсивностей тепловыделения на стенде принимались таким образом, чтобы соблюсти условия подобия процессов теплопереноса между лабораторным стендом и реальными условиями в шахте. Масштабирование скорости и теплового потока производилось по методу, описанному в [10]:

$$\frac{V_{ст}}{V_{ш}} = \left( \frac{L_{ст}}{L_{ш}} \right)^{1/2}, \tag{1}$$

$$\frac{W_{ст}}{W_{ш}} = \left( \frac{L_{ст}}{L_{ш}} \right)^{5/2}, \tag{2}$$

где  $V$  – скорость воздушного потока, м/с;  $W$  – тепловая мощность источника, Вт;  $L$  – характерный размер

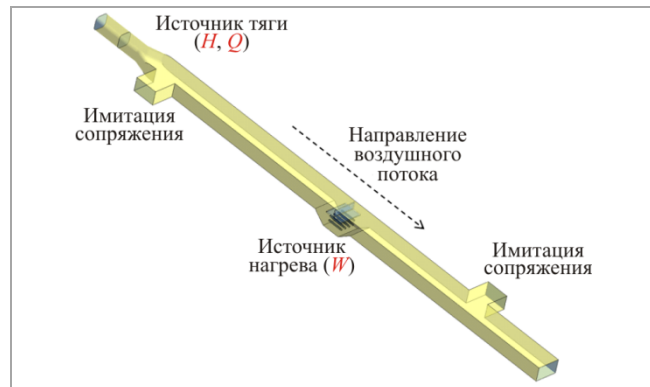


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда



Рис. 2. Фотоснимки лабораторного стенда

выработки,  $m$ ; индексы «ст» и «ш» обозначают соответственно стенд и шахтные условия.

Примечательно, что ключевым критерием подобия в задачах с тепловой конвекцией в отдельных горных выработках (и тоннелях) является не число Рейнольдса, а число Фруда при условии соблюдения геометрического подобия расчетной области. Маккаффри и Кинтбер [38] показали, что соблюдение критерия по числу Фруда приводит к равным соответствующим температурам между масштабированной моделью и полномасштабной системой.

Тем не менее в рамках настоящей работы мы также подбирали параметры стенда таким образом, чтобы соблюсти диапазон чисел Рейнольдса, при котором течение воздуха в воздуховоде происходит в режиме развитой турбулентности ( $Re > 10\,000$ ).

Для типовых горных выработок угольных шахт и подсечных и откаточных горизонтов полиметаллических рудников Красноярского края характерный диаметр поперечного сечения варьируется в диапазоне от 3,6 до 5,2 м. Скорость воздуха меняется в диапазоне от 0 до 8 м/с (если речь не идет о главных вентиляционных штреках или стволах). С учетом характерного поперечного диаметра лабораторного воздуховода ( $L_{ст} = 0,375$  м) скорость воздушного потока в лабораторном воздуховоде должна варьироваться в диапазоне от 0 до 2,56 м/с. При этом режим развитой турбулентности в воздуховоде будет обеспечен при скорости потока более 0,4 м/с.

Характерные мощности тепловыделений от локальных источников возгорания в горных выработках существенно зависят от времени [39]. Эквивалентное значение тепловыделений от возгорания различной горной техники (погрузочно-доставочные машины, буровые установки, самосвалы) достигает 8 МВт. Эквивалентное значение тепловыделений от возгорания протяженных тепловых источников (например, конвейерные ленты) немного выше [2, 40], однако они не являются предметом настоящего исследования. По данной причине с учетом формулы (2) в лабораторном стенде достаточно воспроизвести тепловую мощность источника нагрева, равную 30,8 кВт, причем данная



величина соответствует наименьшему характерному диаметру горных выработок (3,6 м).

Данная величина несколько выше максимальной тепловой мощности, достижимой в настоящий момент в лабораторных условиях (22 кВт). Это указывает на то, что разработанный лабораторный стенд применим в первую очередь для анализа закономерностей процессов теплопереноса в выработках подземных горизонтов с характерным диаметром поперечного сечения более 4 м. Тем не менее, по нашему мнению, он также может быть полезен и при анализе воздухообмена в горных выработках меньшего сечения, для которых стенд позволит на качественном уровне уловить основные закономерности процессов теплопереноса.

### Математическая модель и ее валидация

Экспериментальные исследования на лабораторном стенде использовались для валидации математической модели течения воздуха в воздуховоде. Данная модель в перспективе после валидации позволит определять условия возникновения возвратных течений воздуха в широком диапазоне параметров воздушного потока в горизонтальных и наклонных горных выработках, геометрических параметров этих горных выработок, параметров источника нагрева.

Основу математической модели составляли уравнения неразрывности, Навье – Стокса, баланса энергии, а также уравнение состояния идеального газа. Ввиду турбулентного характера течения воздуха в воздуховоде, к указанным уравнениям применялась операция усреднения по Рейнольдсу, а для замыкания полученных усредненных уравнений использовалась гипотеза Буссинеска и двухпараметрическая модель турбулентности Realizable k-epsilon. Данная модель турбулентности принималась основной при проведении численных расчетов, однако помимо нее на этапе настройки модели также проводились расчеты на моделях SST k-omega и Reynolds stress model (RSM).

На входе в расчетную область задавалось граничное условие типа pressure inlet, на выходе – граничное условие типа pressure outlet. Наличие источника тяги задавалось посредством внутренней поверхности типа «интерфейс» с заданным перепадом давления в зависимости от расхода. На обеих границах принималось нулевое давление. На твердых стенках принималось условие прилипания потока, а для расчета параметров потока в тонком пограничном слое использовались стандартные пристеночные функции. Средняя высота шероховатости стенок воздуховода принималась равной 0,8 мм. На поверхности источника нагрева задавался равномерный тепловой поток заданной тепловой мощности  $W$  (Вт).

Строилась нерегулярная тетраэдрическая конечно-объемная сетка с призматическим пограничным слоем вблизи твердых стенок. Параметры сетки подбирались таким образом, чтобы обеспечить независимость решения от сетки. Размер ближайшей к стенке воздуховода ячейки-тетраэдра принимался равным 30 мм. На поверхности источника нагрева размер ближайшей ячейки-тетраэдра задавался равным 4 мм. На данных поверхностях также задавалось по 6 призматических пограничных слоев. Итоговое количество ячеек составило 1 586 296.

На основании предварительного моделирования теплообменных процессов в воздуховоде определялись наиболее подходящие места инструментальных замеров на лабораторном стенде (рис. 3). В рамках настоящего исследования при валидации модели по данным лабораторных исследований

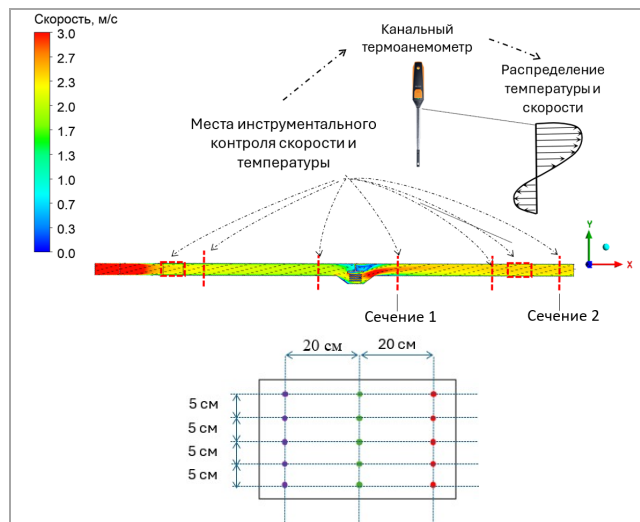


Рис. 3. Места инструментального контроля

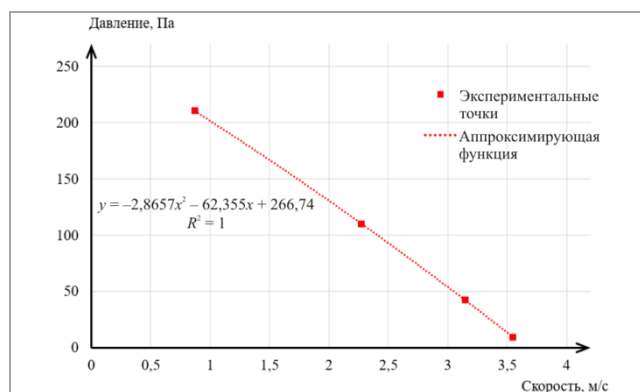


Рис. 4. Определение фактической характеристики вентилятора на аэродинамическом стенде

основное внимание уделялось сечениям 1 и 2, расположенным дальше по потоку относительно источника нагрева.

Важным аспектом, необходимым для корректного модельного воспроизведения воздушных потоков в лабораторном стенде, является учет фактической аэродинамической характеристики вентилятора, обеспечивающего движение воздуха в экспериментальном стенде. С целью определения характеристики вентилятора выполнена серия натурных измерений скорости воздушного потока и перепада давления на стенде. Перепад определялся с использованием дифференциального манометра как разница давления непосредственно после вентилятора и давления вблизи выходного сечения воздуховода.

Измерения скорости воздушного потока проводились в сечении около выхода из воздуховода в трех вертикальных профилях, с шагом выполнения измерений по вертикали 5 см. Расстояние между вертикальными профилями составляло 20 см. Принципиальная схема точек измерения скорости приведена на рис. 3. Для полученных полей скоростей по измеренным точкам был выполнен пересчет средней скорости воздушного потока в сечении на выходе из системы воздуховода.

Измерению подлежали четыре режима проветривания воздуховода – при различных параметрах воздушного клапана, расположенного около выходного отверстия из воздуховода. При измерении фиксировалась частота вращения установленного осевого вентилятора и изменялась степень закрытия воздушного клапана. Вариация степени закрытия воздушного клапана

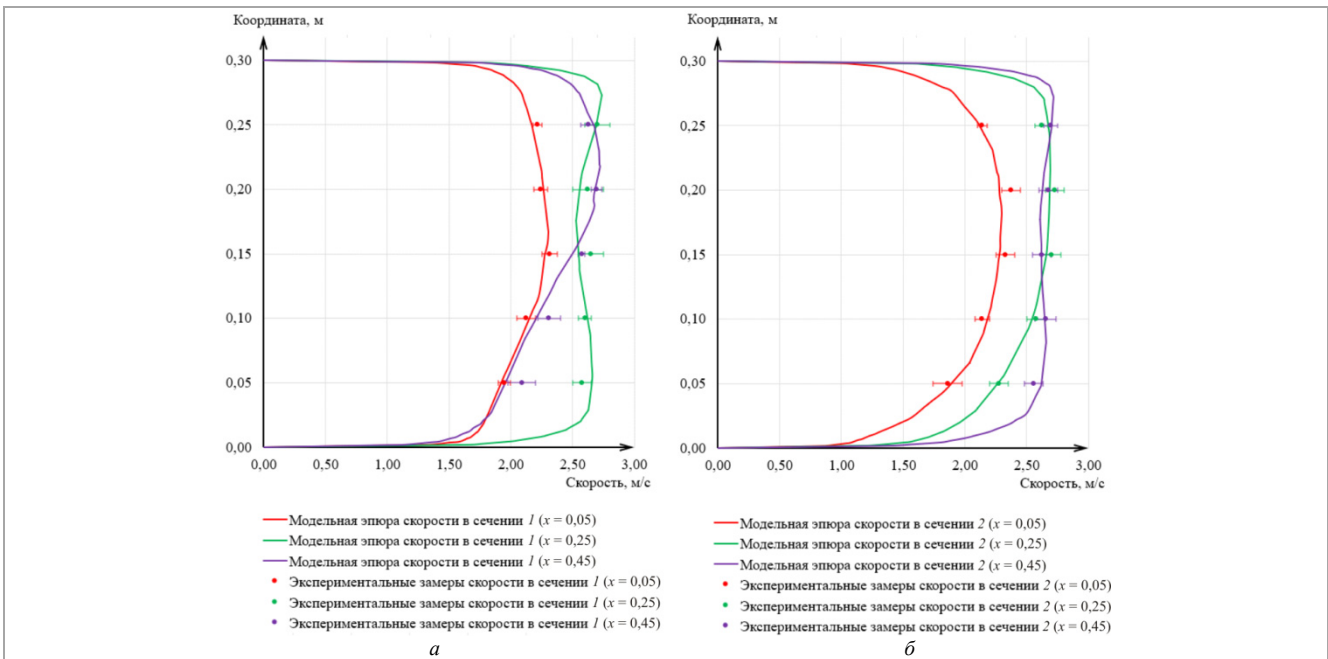


Рис. 5. Сравнительный анализ теоретических эпюр и экспериментально измеренных значений продольной компоненты скорости воздушного потока в сечениях 1 (а) и 2 (б)

позволяла изменить аэродинамическое сопротивление системы и тем самым получить разные точки на характеристике вентилятора.

По полученные по результатам измерений точки были аппроксимированы полиномиальной зависимостью второй степени вида  $P = aV^2 + bV + c$ . Полученная зависимость  $P(V)$  представлена на рис. 4. Отдельными точками показаны экспериментальные замеры на лабораторном стенде.

Еще одним важным аспектом при начальной параметризации модели является выбор коэффициента теплопередачи через стенку воздуховода. Часть теплоты, сообщаемая потоку от источника нагрева, отводится через стенки воздуховода в окружающую атмосферу. Причем этот тепловой фактор в большей степени проявляется для участка воздуховода ниже источника нагрева. Поэтому для учета этого теплового фактора коэффициент теплопередачи подбирался таким образом, чтобы добиться наилучшего соответствия по модельным и измеряемым значениям средних температур воздуха в сечениях 1 и 2. Эффективное значение коэффициента теплопередачи составило 150 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Валидация трехмерной численной модели осуществлялась путем сопоставления рассчитанных на модели эпюр скорости и температуры с точками, полученными в натурных измерениях в сечениях 1 и 2, указанных на рис. 3. На рис. 5 представлены теоретические кривые и экспериментальные точки для продольной компоненты скорости воздушного потока, а на рис. 6 показаны теоретические кривые и экспериментальные точки для температуры воздушного потока. Рассмотрена ситуация тепловой мощности источника, равной 14,5 кВт, угла наклона воздуховода, равного 0°. С учетом того, что при интенсивном нагреве воздушного потока измеряемые величины менялись во времени (т.е. распределение аэротермодинамических характеристик воздушного потока было нестационарным), на рис. 5, 6, помимо средних значений измеренных скорости и температуры воздушного потока, выводились также минимальное и максимальное наблюдаемые значения данных по выборке данных измерений в отдельных точках – они

изображены с использованием элементов так называемых усиковой диаграммы.

Сопоставление распределений скорости и температуры воздушного потока также проводилось при других значениях мощности тепловыделений, однако данные не вошли в настоящую статью. В целом полученные данные позволяют судить о хорошем соответствии численного моделирования и лабораторного эксперимента при рассмотренном угле наклона воздуховода. Для отдельных экспериментальных точек наблюдаются несущественные количественные расхождения с данными численного моделирования, однако в целом на качественном уровне модельные кривые и экспериментальные точки демонстрируют одинаковый характер изменения скоростей и температур воздушного потока по сечению.

В обоих рассмотренных сечениях также имеет место хорошее соответствие модельных и экспериментальных данных по средним значениям скорости и температуры. Это в большей степени обеспечивается предварительной калибровкой математической модели, в то время как схожий характер отклонений исследуемых параметров потока от соответствующих средних значений уже показывает корректную работу выбранной математической модели.

Вместе с тем в рамках данного исследования также проведен сравнительный анализ различных моделей турбулентности: основной модели Realizable k-epsilon и двух других RANS моделей – SST k-omega и RSM. Рассчитанные эпюры скорости и температуры воздушного потока в сечениях 1 и 2 на трех различных моделях турбулентности представлены на рис. 7. Кривые приведены только для центральных вертикальных профилей (см. рис. 3, зеленый цвет) как наиболее показательных.

Модели Realizable k-epsilon и SST k-omega дают довольно близкие друг к другу результаты как по скорости воздушного потока (максимальное рассогласование 0,1 м/с), так и по температуре (максимальное рассогласование 2,3 °C). В то время как модель RSM при определенных условиях показывает более выраженную дифференциацию температур по высоте сечения, а максимальная разница с моделью

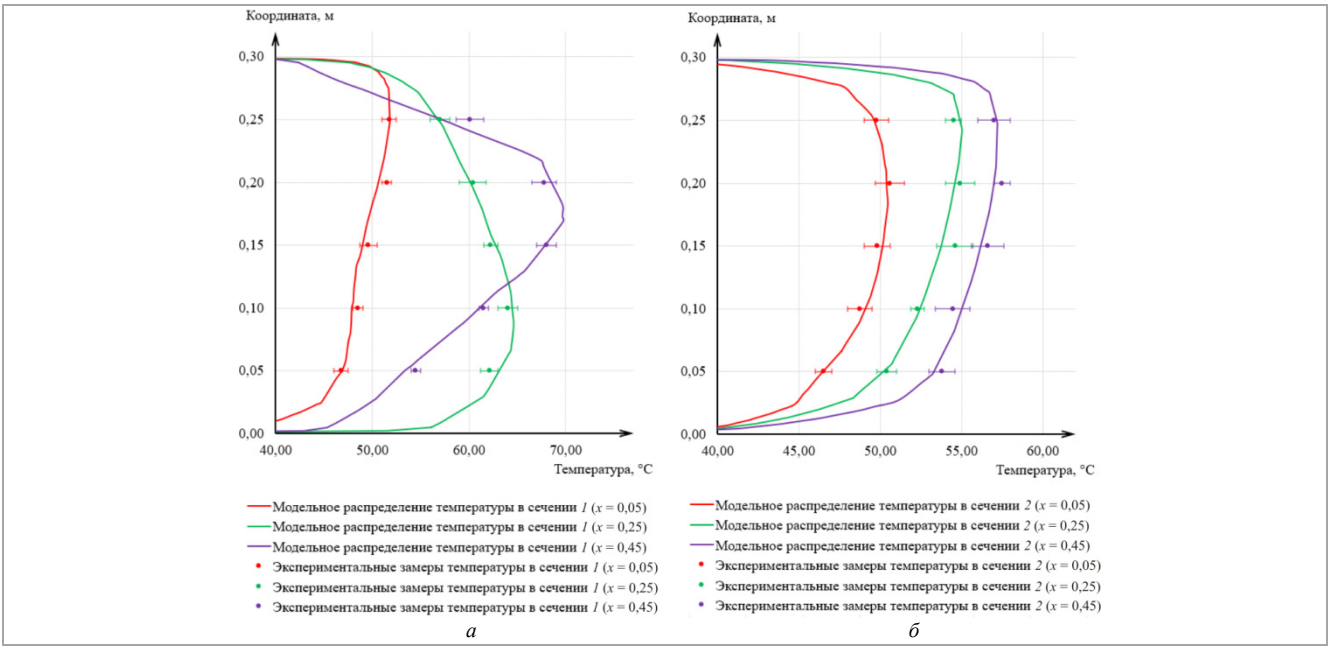


Рис. 6. Сравнительный анализ теоретических эпор и экспериментально измеренных значений температуры воздушного потока в сечениях 1 (а) и 2 (б)

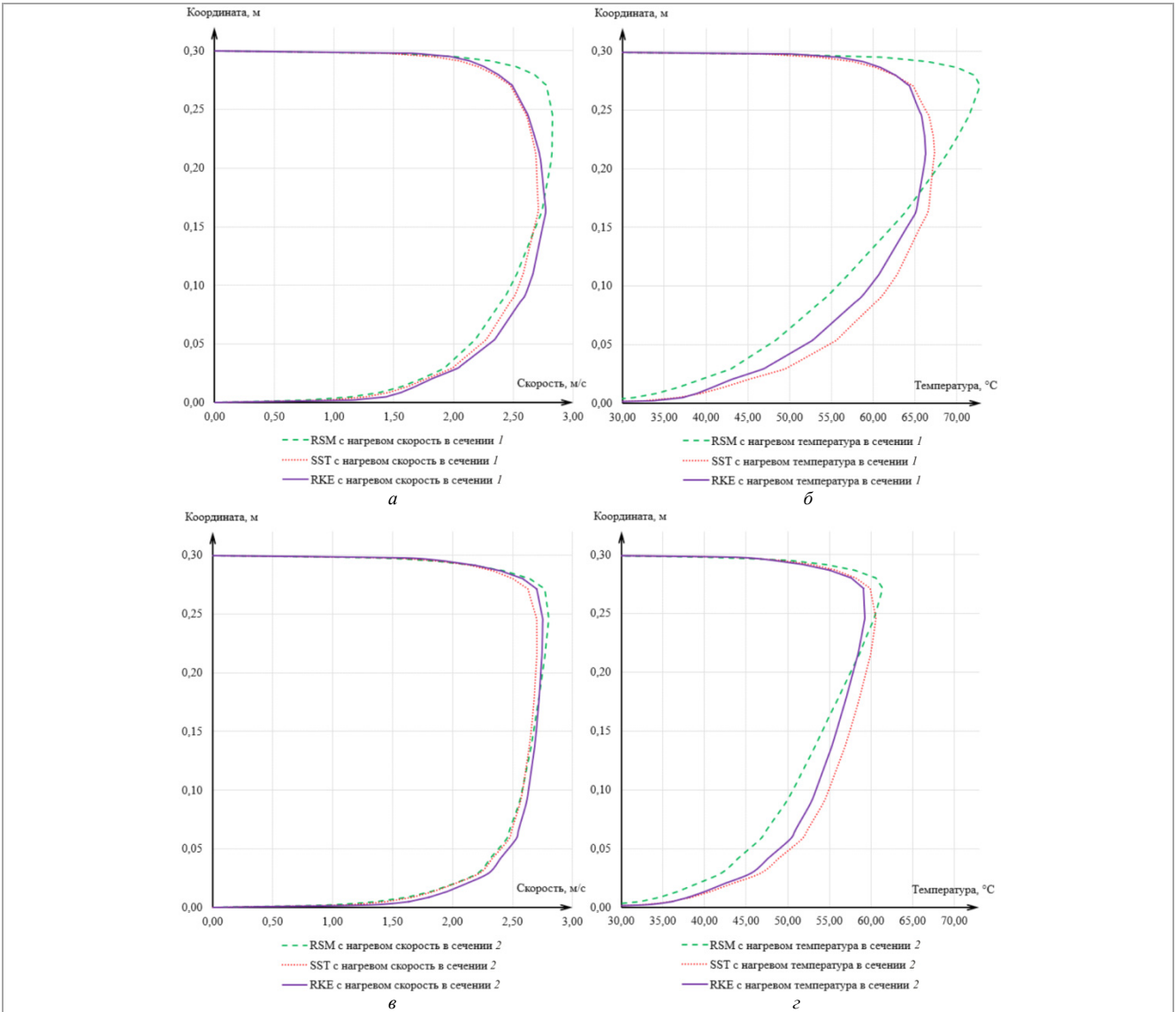


Рис. 7. Сравнительный анализ теоретических эпор продольной компоненты скорости и температуры воздушного потока в сечениях 1 (а, б) и 2 (в, г) для различных моделей турбулентности

Realizable k-epsilon по температурам составляет 8,4 °С. Это рассогласование является уже довольно существенным и составляет более 25 % от характерного перепада температур в задаче. Вместе с тем модель RSM также имеет существенные расхождения и с данными лабораторного эксперимента как в количественном плане, так и на качественном уровне.

### Заключение

Описан разработанный и смонтированный лабораторный стенд, представляющий собой уменьшенную физическую модель горной выработки с варьируемым углом наклона и предназначенный для исследования закономерностей теплопереноса в горизонтальных и наклонных горных выработках в условиях наличия интенсивных источников тепловыделения.

Проведенная на стенде серия экспериментальных изменений скорости и температуры воздушного потока использована для валидации математической модели

теплопереноса в канале в трехмерной постановке с использованием модели турбулентности Realizable k-epsilon. Результаты сравнительного анализа данных численного моделирования и лабораторных экспериментов показали приемлемое соответствие как на качественном, так и на количественном уровнях.

Проведен сравнительный анализ результатов расчета теплопереноса в наклонном канале на трех различных моделях турбулентности. Показано, что модели Realizable k-epsilon и SST k-omega в равной степени применимы для теоретического анализа процессов теплопереноса в рассматриваемом лабораторном стенде, в то время как более сложная модель RSM имеет значимые различия с данными расчетов на моделях Realizable k-epsilon и SST k-omega, а также с данными проведенного эксперимента.

В дальнейшем планируется провести сравнительный анализ данных экспериментальных измерений и математического моделирования при различных углах наклона воздуховода.

### Библиографический список

- Шалимов, А.В. Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт / А.В. Шалимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №. 6. – С. 84–92.
- Brake, D.J. Fire modelling in underground mines using VentSim Visual VentFire Software / D.J. Brake // Proceedings of the Australian mine ventilation conference. – Adelaide, SA, Australia, 2013. – P. 1–3.
- Хацько, М.С. Разработка комплекса мероприятий по снижению рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на шахте / М.С. Хацько, С.А. Онищенко // Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения. – 2021. – С. 46–49.
- Палеев, Д.Ю. Состояние и перспективы научного обеспечения горноспасательных работ / Д.Ю. Палеев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – №. 1. – С. 22–28.
- Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли / В.А. Родионов, С.А. Турсенева, И.Л. Скрипник, Ю.Г. Ксенофонтов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3
- Determination of kinetic parameters and conditions of the spontaneous combustion of coal during its transportation / V. Rodionov, I. Skripnik, Y. Ksenofontov, T. Kaverzneva, I. Idrisova, I. Alibekova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2467, № 1. DOI: 10.1063/5.0093906
- Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений / М.В. Рыльникова, Г.И. Айнбиндер, Н.А. Митишова, Л.А.С. Гаджиева // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – №. 2. – С. 341–356.
- Закономерности возгорания метана и угольной пыли от электрического источника в горных выработках / И.Е. Колесниченко, Е.А. Колесниченко, Е.И. Любомищенко, Е.И. Колесниченко, А.А. Евсюкова // Горная промышленность. – 2021. – №. 4. – С. 119–124. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-119-124
- Investigation of a conveyor belt fire in an underground coal mine: Experimental studies and CFD analysis / C.O. Aksoy, G.G.U. Aksoy, A. Fisne, I. Alagoz, E. Kaya // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2023. – Vol. 123, №. 12. – P. 589–597. DOI: 10.17159/2411-9717/1613/2023
- Oka, Y. Control of smoke flow in tunnel fires / Y. Oka, G.T. Atkinson // Fire safety journal. – 1995. – Vol. 25, №. 4. – P. 305–322. DOI: 10.1016/0379-7112(96)00007-0
- Atkinson, G.T. Smoke control in sloping tunnels / G.T. Atkinson, Y. Wu // Fire safety journal. – 1996. – Vol. 27, №. 4. – P. 335–341. DOI: 10.1016/S0379-7112(96)00061-6
- Wu, Y. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity / Y. Wu, M.Z.A. Bakar // Fire safety journal. – 2000. – Vol. 35, №. 4. – P. 363–390. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00031-X
- Stewart, C.M. Underground fire rollback simulation in large scale ventilation models / C.M. Stewart, S.M. Aminossadati, M.S. Kizil // 15th North American Mine Ventilation Symposium. – 2015.
- Левин, Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии / Л.Ю. Левин, Д.Ю. Палеев, М.А. Семин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – №. 1. – С. 81–85.
- Peng, S. Numerical simulation study on fire hazard of a coal mine transport roadway / S. Peng, Z. Huang, D.W. Dong // Mining Science. – 2022. – Vol. 29. DOI: 10.37190/msc222904
- Numerical study on fire behavior and temperature distribution in a blind roadway with different sealing situations / Y. Yao, J. Wang, L. Jiang, B. Wu, B. Qu // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30, №. 13. – P. 36967–36978. DOI: 10.1007/s11356-022-24896-4
- Hua, N. Review of tunnel fire damage assessment methods and techniques / N. Hua, N. Elhami-Khorasani, A. Tessari // Transportation research record. – 2021. – Vol. 2675, №. 5. – P. 279–290. DOI: 10.1177/0361198120987228
- Experimental study on the performance of synergistic ventilation system combining shaft with mechanical ventilation in extra-long road tunnels / B. Zhu, H. Cong, B. Yu, Z. Shao, L. Ye, Y. Bi, Y. Zeng // Tunneling and Underground Space Technology. – 2024. – Vol. 147. – P. 105706. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105706
- Adjiski, V. Monte Carlo simulation of uncertain parameters to evaluate the evacuation process in an underground mine fire emergency / V. Adjiski, V. Zubicek, Z. Despodov // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2019. – Vol. 119, №. 11. – P. 907–917. DOI: 10.17159/2411-9717/701/2019
- Overview of mine rescue approaches for underground coal fires: A South African perspective / M. Onifade, B. Genc, K.O. Said, M. Fourie, P.O. Akinseye // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2022. – Vol. 122, №. 5. – P. 213–226. DOI: 10.17159/24119717/1738/2022
- A study on rapid simulation of mine roadway fires for emergency decision-making / Y. Chen, J. Liu, Q. Zhou, L. Liu, D. Wang // Scientific reports. – 2024. – Vol. 14, №. 1. – P. 1674. DOI: 10.1038/s41598-024-51900-3
- Li, L. Characteristics of the spatial and temporal evolution of the environmental parameters for belt fire in underground coal mine roadway / L. Li, J. Si, Z. Li // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 49. – P. 103346. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103346
- Numerical simulation and application study on a remote emergency rescue system during a belt fire in coal mines / K. Wang, S. Jiang, X. Ma, Z. Wu, H. Shao, W. Zhang, C. Cui // Natural Hazards. – 2016. – Vol. 84. – P. 1463–1485. DOI: 10.1007/s11069-016-2538-z
- Bahrami, D. Field verification of an improved mine fire location model / D. Bahrami, L. Zhou, L. Yuan // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2021. – Vol. 38, №. 1. – P. 559–566. DOI: 10.1007/s42461-020-00314-6
- Laage, L. Computer aided underground mine fire location / L. Laage, W. Pomroy, A. Bartholomew // 23rd International Conference of Safety in Mines Research Institutes. – 1989. – С. 27–89.
- Brodny, J. The application of model-based tests for analysing the consequences of methane combustion in a mine heading ventilated through a forcing air duct / J. Brodny, M. Tutak, A. John // Mechanics. – 2019. – Vol. 25, №. 3. – P. 204–209. DOI: 10.5755/j01.mech.25.3.23739
- Методологический подход к контролю и оценке взрывопожароопасности рудничной атмосферы / С.Я. Жихарев, В.А. Родионов, Д.С. Кормщиков, В.А. Никашин // Горный журнал. – 2023. – №. 11. – С. 75–80. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.12
- Adjiski, V. Possibilities for simulating the smoke rollback effect in underground mines using CFD software / V. Adjiski // GeoScience Engineering. – 2014. – Vol. 60, №. 2. – P. 8–18. DOI: 10.2478/gse-2014-0008
- Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, М.А. Семин, Е.Л. Гришин, Н.А. Трушкова // Горный журнал. – 2014. – №. 12. – С. 105–109.
- Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels / H. Kurioka, Y. Oka, H. Satoh, O. Sugawa // Fire safety journal. – 2003. – Vol. 38, №. 4. – P. 319–340. DOI: 10.1016/S0379-7112(02)00089-9
- Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling / L.H. Hu, R. Huo, H.B. Wang, Y.Z. Li, R.X. Yang // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42, №. 11. – P. 3905–3915. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.052
- An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a sloping tunnel fire / L.H. Hu, L.F. Chen, L. Wu, Y. F. Li, J.Y. Zhang, N. Meng // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 51, №. 1–2. – P. 246–254. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.07.043
- Li, Y.Z. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires / Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason // Fire safety journal. – 2010. – Vol. 45, №. 6–8. – P. 361–370. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.07.003
- Yuan, L. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires / L. Yuan, L. Zhou, A.C. Smith // Applied thermal engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 1319–1326. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.007
- Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» / М.Д. Попов, Д.С. Кормщиков, М.А. Семин, Л.Ю. Левин // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №. 10. – С. 24–32. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32
- Hwang, C.C. The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation / C.C. Hwang, J.C. Edwards // Fire safety journal. – 2005. – Vol. 40, №. 3. – P. 213–244. DOI: 10.1016/j.firesaf.2004.11.001



37. Hong, S.B. Application of the Bernoulli Effect for Improving Smoke Exhaust Efficiency in Tunnel Fires / S.B. Hong, H.S. Yun, M.K. Cho // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – Art. № 107685. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3318864
38. McCaffrey B.J. Buoyancy driven countercurrent flows generated by a fire source / B.J. McCaffrey, J.G. Quintiere // Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection. – Washington, USA: Hemisphere Publishing Co, 1977. – P. 457–472.
39. Попов, М.Д. Расчет мощности тепловыделений при распределенных и точечных пожарах в рудничных вентиляционных сетях / М.Д. Попов, А.В. Тацкий // Горное эко. – 2022. – №. 3. – С. 98–104. DOI: 10.7242/echo.2022.3.16
40. Моделирование пожара в выработке угольной шахты с использованием программного комплекса Fire Dynamics Simulator / А.И. Кин, С.А. Лисаков, А.Ю. Сидоренко, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин // Материалы XXI Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM-2020). Новосибирск, 2020. – С. 53.

References

1. Shalimov A.V. Chislennoe modelirovaniye gazovozdushnykh potokov v ekstremal'nykh situatsiyakh i avariynnykh rezhimov provetrvaniia rudnikov i shakht [Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 6, pp. 84-92.
2. Brake D.J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. *Proceedings of the Australian mine ventilation conference*, Adelaide, SA, Australia, 2013, pp. 1-3.
3. Khatsko M.S., Onishchenko S.A. Razrabotka kompleksa meropriatii po snizheniiu riskov vozniknoveniia chrezvychaynykh situatsii na shakhte [Development of a set of measures to reduce the risks of emergencies at the mine]. *Sovremennye issledovaniia v nauках o Zemle: retrospektiva, aktual'nye trendy i perspektivy vnedreniia*, 2021, pp. 46-49.
4. Paleev D.Iu. Sostoiianie i perspektivy nauchnogo obespecheniia gornospasatel'nykh rabot [Condition and prospects of mine rescue works scientific support]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti*, 2020, no. 1, pp. 22-28.
5. Rodionov V.A., Tursenev S.A., Skripnik I.L., Ksenofontov Iu.G. Rezultaty issledovaniia kineticheskikh parametrov samovozgoraniia kamennougol'noi pyli [Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 246, pp. 617-622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3
6. Rodionov V., Skripnik I., Ksenofontov Y., Kaverzneva T., Idrisova J., Alibekova I. Determination of kinetic parameters and conditions of the spontaneous combustion of coal during its transportation. *AIP Conference Proceedings*. - AIP Publishing, 2022, vol. 2467, no. 1. DOI: 10.1063/5.0093906
7. Ryl'nikova M.V., Ainbinder G.I., Mitishova N.A., Gadzhieva L.A.S. Issledovanie zakonomernosti vozgoraniia sul'fidnykh rud i porod pri kombinirovannoi razrabotke mestorozhdenii [Researching regulations of fire sulfide ore and breed during combined deposit development]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2020, no. 2, pp. 341-356.
8. Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Liubomishchenko E.I., Kolesnichenko E.I., Evsiukova A.A. Zakonomernosti vozgoraniia metana i ugol'noi pyli ot elektricheskogo istochnika v gornykh vyrabotkakh [Regularities of Methane and Coal Dust Ignition caused by Electric Sources in Mine Workings]. *Gornaia promyshlennost'*, 2021, no. 4, pp. 119-124. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-119-124
9. Aksoy C.O., Aksoy G.G.U., Fisse A., Alagoz I., Kaya E. Investigation of a conveyor belt fire in an underground coal mine: Experimental studies and CFD analysis. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2023, vol. 123, no. 12, pp. 589-597. DOI: 10.17159/2411-9717/1613/2023
10. Oka Y., Atkinson G.T. Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire safety journal*, 1995, vol. 25, no. 4, pp. 305-322. DOI: 10.1016/0379-7112(96)00007-0
11. Atkinson G.T., Wu Y. Smoke control in sloping tunnels. *Fire safety journal*, 1996, vol. 27, no. 4, pp. 335-341. DOI: 10.1016/S0379-7112(96)00061-6
12. Wu Y., Bakar M.Z.A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity. *Fire safety journal*, 2000, vol. 35, no. 4, pp. 363-390. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00031-X
13. Stewart C.M., Aminossadati S.M., Kizil M.S. Underground fire rollback simulation in large scale ventilation models. *15th North American Mine Ventilation Symposium*, 2015.
14. Levin L.Iu., Paleev D.Iu., Semin M.A. Raschet ustoiichivosti vozdushnykh potokov v vyrabotkakh shakhtnykh ventilatsionnykh setei po faktoru teplovoi depressii [Calculation of air streams stability in the workings of mine ventilation networks by the factor of thermal depression]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti*, 2020, no. 1, pp. 81-85.
15. Peng S., Huang Z., Dong D.W. Numerical simulation study on fire hazard of a coal mine transport roadway. *Mining Science*, 2022, vol. 29. DOI: 10.37190/msc222904
16. Yao Y., Wang J., Jiang L., Wu B., Qu B. Numerical study on fire behavior and temperature distribution in a blind roadway with different sealing situations. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, no. 13, pp. 36967-36978. DOI: 10.1007/s11356-022-24896-4
17. Hua N., Elhami-Khorasani N., Tessari A. Review of tunnel fire damage assessment methods and techniques. *Transportation research record*, 2021, vol. 2675, no. 5, pp. 279-290. DOI: 10.1177/0361198120987228
18. Zhu B., Cong H., Yu B., Shao Z., Ye L., Bi Y., Zeng Y. Experimental study on the performance of synergistic ventilation system combining shaft with mechanical ventilation in extra-long road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 147, 105706 p. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105706
19. Adjiski V., Adjiski V., Zubicek V., Despodov Z. Monte Carlo simulation of uncertain parameters to evaluate the evacuation process in an underground mine fire emergency. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2019, vol. 119, no. 11, pp. 907-917. DOI: 10.17159/2411-9717/701/2019
20. Onifade M., Genc B., Said K.O., Fourie M., Akinseye P.O. Overview of mine rescue approaches for underground coal fires: A South African perspective. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2022, vol. 122, no. 5, pp. 213-226. DOI: 10.17159/24119717/1738/2022
21. Chen Y., Liu J., Zhou Q., Liu L., Wang D. A study on rapid simulation of mine roadway fires for emergency decision-making. *Scientific reports*, 2024, vol. 14, no. 1, 1674 p. DOI: 10.1038/s41598-024-51900-3
22. Li L., Si J., Li Z. Characteristics of the spatial and temporal evolution of the environmental parameters for belt fire in underground coal mine roadway. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 49, 103346 p. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103346
23. Wang K., Jiang S., Ma X., Wu Z., Shao H., Zhang W., Cui C. Numerical simulation and application study on a remote emergency rescue system during a belt fire in coal mines. *Natural Hazards*, 2016, vol. 84, pp. 1463-1485. DOI: 10.1007/s11069-016-2538-z
24. Bahrami D., Zhou L., Yuan L. Field verification of an improved mine fire location model. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, vol. 38, no. 1, pp. 559-566. DOI: 10.1007/s42461-020-00314-6
25. Laage L., Pomroy W., Bartholomew A. Computer aided underground mine fire location. *23rd International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, 1989, pp. 27-89.
26. Brodny J., Tutak M., John A. The application of model-based tests for analysing the consequences of methane combustion in a mine heading ventilated through a forcing air duct. *Mechanics*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 204-209. DOI: 10.5755/j01.mech.25.3.23739
27. Zhikharev S.I.a., Rodionov V.A., Kormshchikov D.S., Nikashin V.A. Metodologicheskii podkhod k kontroliu i otsenke vzryvopozharoопасnosti rudnichnoi atmosfery [Methodological approach to monitoring the composition of mine atmosphere and determining safe conditions for underground mining operations]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 75-80. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.12
28. Adjiski V. Possibilities for simulating the smoke rollback effect in underground mines using CFD software. *GeoScience Engineering*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 8-18. DOI: 10.2478/gse-2014-0008
29. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A., Grishin E.L., Trushkova N.A. Konvektivnaia stratifikatsiia vozdushnykh potokov po secheniiu gornykh vyrabotok, ee rol' v formirovaniu pozharnykh teplovykh depressii i vliianie na ustoiichivost' provetrvaniia [Convective stratification of air flows across the cross-section of mine workings, its role in the formation of fire thermal depressions and the impact on the stability of ventilation]. *Gornyi zhurnal*, 2014, no. 12, pp. 105-109.
30. 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
31. L.H. Hu, R. Huo, H.B. Wang, Li Y.Z., Yang R.X. Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, no. 11, pp. 3905-3915. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.052
32. Hu L.H., Chen L.F., Wu L., Li Y.F., Zhang J.Y., Meng N. An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a sloping tunnel fire. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 51, no. 1-2, pp. 246-254. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.07.043
33. Li Y.Z., Lei B., Ingason H. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire safety journal*, 2010, vol. 45, no. 6-8, pp. 361-370. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.07.003
34. 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
35. Popov M.D., Kormshchikov D.S., Semin M.A., Levin L.Iu. Raschet ustoiichivosti vozdushnykh potokov v gornykh vyrabotkakh po faktoru teplovoi depressii v analiticheskom komplekse "Aeroset" [Calculation of air flows stability in the mine workings by the factor of thermal depression in the analytical complex "Aeroset"]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2020, no. 10, pp. 24-32. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32
36. Hwang C.C., Edwards J.C. The critical ventilation velocity in tunnel fires - a computer simulation. *Fire safety journal*, 2005, vol. 40, no. 3, pp. 213-244. DOI: 10.1016/j.firesaf.2004.11.001
37. Hong S.B., Yun H.S., Cho M.K. Application of the Bernoulli Effect for Improving Smoke Exhaust Efficiency in Tunnel Fires. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, Art. no. 107685. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3318864
38. McCaffrey B.J., Quintiere J.G. Buoyancy driven countercurrent flows generated by a fire source. *Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection*. Washington, USA: Hemisphere Publishing Co, 1977, pp. 457-472.
39. Popov M.D., Tsiatsii A.V. Raschet moshchnosti teplovydelenii pri raspredelennykh i tochechnykh pozharakh v rudnichnykh ventilatsionnykh setiakh [Calculation of heat emission power during distributed and point fires in mine ventilation networks]. *Gornoe ekho*, 2022, no. 3, pp. 98-104. DOI: 10.7242/echo.2022.3.16
40. Kin A.I., Lisakov S.A., Sidorenko A.Iu., Sidorenko A.I., Sypin E.V. Modelirovaniye pozhara v vyrabotke ugol'noi shakhty s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa Fire Dynamics Simulator [Modeling a fire in a coal mine using the Fire Dynamics Simulator software package]. *Materialy XXI Mezhduнародnoi konferentsii molodykh spetsialistov po mikro/nanotekhnologiiam i elektronnyim priboram (EDM-2020)*. Novosibirsk, 2020, 53 p.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номера НИОКТР: 124020500030-7, 122030100425-6).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.