

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

АНАЛИЗ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В НАКЛОННОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИВНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

М. Д. Попов, М. А. Семин, Л. Ю. Левин

*Горный институт УрО РАН,
E-mail: seminma@inbox.ru, ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрено конвективное расслоение воздушных потоков в наклонной горной выработке в условиях наличия интенсивного источника тепловыделений. Методология исследования включала численное трехмерное моделирование нестационарных аэротермодинамических процессов в наклонной и примыкающей к ней горизонтальной горных выработках. Показаны три возможных сценария конвективного расслоения потоков в наклонной горной выработке в зависимости от мощности тепловыделений. Определена зависимость критической тепловой мощности источника нагрева от начальной депрессии и угла наклона горной выработки. Проанализирована зависимость перепада давления в наклонной выработке от массового расхода при разных мощностях тепловыделений по данным численного трехмерного моделирования, а также на одномерной сетевой модели. Описание подземных пожаров в горных выработках с помощью одномерных моделей требует привлечения эмпирических зависимостей аэродинамического сопротивления и средней плотности воздуха от расхода воздуха.

Рудничная вентиляция, подземный пожар, тепловая депрессия, устойчивость проветривания, моделирование, вентиляционная сеть

DOI: 10.15372/FTPRPI20240412

EDN: UCQKGU

Критическая скорость воздуха и тепловая мощность — важные показатели, характеризующие развитие подземного пожара в горной выработке и распространение продуктов горения по сети горных выработок. Критическая скорость воздуха — минимальная скорость, при которой исключаются возвратные течения воздушного потока и продуктов горения по горной выработке, критическая тепловая мощность — такое тепловыделение от источника возгорания, при котором начинают происходить возвратные течения [1 – 3].

Исследование выполнено при финансовой помощи РФФИ (проект № 20-35-90072), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).

В [4] понятие критической скорости является ключевым в определении стадий развития возвратных течений воздуха при пожаре:

- 1) стадия критической скорости, когда поток однонаправленный, так как обеспечена минимальная критическая скорость для пожара заданной мощности;
- 2) частично-возвратные течения газозвоздушной смеси;
- 3) полностью возвратные течения газозвоздушной смеси.

Критическая скорость и тепловая мощность пожара — взаимосвязанные параметры. Большое количество работ посвящено определению связи между ними. В [5] экспериментально на модельном стенде, имитирующем туннель, получены общие выражения, связывающие критическую скорость и тепловую мощность пожара:

$$V_c = \begin{cases} 0.35q^{*0.3}, & q^* \leq 0.12, \\ 0.35, & q^* > 0.12, \end{cases}$$

где $q^* = Q / (\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} D^{5/2})$ — безразмерная тепловая мощность пожара; Q — размерная мощность пожара, Вт; ρ_0 — плотность воздуха на входе, кг/м³; T_0 — температура воздуха на входе, °С; C_p — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); D — эквивалентный диаметр выработки, м; g — ускорение свободного падения, м/с².

Первый эксперимент на объекте реального размера описан в [6]. Изучен горизонтальный канал длиной 126 м со средней высотой 2.06 м и шириной 2.91 м. Проведенные исследования проанализированы теоретически и определена критическая скорость воздуха в горной выработке, при которой могут происходить возвратные течения воздуха вследствие возгорания:

$$V_c = 0.92 \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} D^{5/2}} \right)^{0.3} \sqrt{gD}.$$

В [5] критическая скорость перестает зависеть от мощности пожара при $q^* > 0.12$, в то время как в формуле из [6] она всегда обусловлена тепловой мощностью пожара. В [4] эти формулы обобщены и получена формула для сетевого расчета теплового эффекта от пожара:

$$V_c = \begin{cases} 0.92 \frac{g^{7/20}}{D^{1/4}} \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0} (1 + 0.014\theta), & q^* \leq q_{cr}^*, \\ 0.92 \sqrt{gD} q^{*0.3} (1 + 0.014\theta), & q^* > q_{cr}^*. \end{cases}$$

Здесь впервые учитывался угол наклона θ горной выработки, где происходит пожар. Данная формула внедрена в пакет MFIRE 3.0.

В зарубежной литературе большое внимание уделяется определению критической скорости как функции различных параметров пожара и исследуемой системы горных выработок. Однако для анализа критическая тепловая мощность пожара более удобный параметр, ее значение должно сопоставляться с начальной депрессией горной выработки, противодействующей тепловой депрессии пожара. Тепловая депрессия, создаваемая источником пожара, — типовой показатель появления возвратных конвективных потоков. При проектировании и эксплуатации угольных шахт этот параметр входит в основное критериальное неравенство, выражающее условие опрокидывания струи при действии тепловой депрессии [7]:

$$H_t \geq H_k, \quad (1)$$

где H_t — тепловая депрессия пожара; H_k — критическая депрессия выработки, Па.

Данный подход имеет недостатки. К примеру, в качестве критической депрессии в (1) обычно берется депрессия искусственной глухой перемычки, установленной в горной выработке. Согласно [8], полученное значение — максимальная депрессия, создаваемая главным вентилятором в момент прекращения поступления воздуха в рассматриваемую выработку из-за тепловой депрессии. Такой одномерный подход не учитывает частично-возвратные течения в выработке, переменность критической депрессии во времени.

В настоящее время доступны программные пакеты для расчета вентиляции рудников с учетом пожаров: АэроСеть, MFIRE, VentGraph, Minefire Pro+, VentFire и др. Конвективная стратификация воздуха в горных выработках с интенсивным источником нагрева представляет собой трехмерное явление, что выходит за рамки данных программных пакетов, основанных на одномерных моделях течения воздуха [9]. В этой связи предложена методология расчета распространения продуктов горения в трехмерной постановке с помощью методов вычислительной динамики жидкости и газа. В дальнейшем численное трехмерное моделирование использовалось с целью поиска закономерностей движения воздуха и продуктов горения для различных практических задач. В [10] исследовано влияние вентиляционных сооружений и преград в выработке на критическую скорость. В [11] показана эффективность закрытия входа в туннель для тушения пожара. В [12] проанализированы закономерности горения конвейерной ленты. В [13] рассмотрен фактор влияния ветра при пожаре на метромосте. В целом выделяют два варианта физических постановок задачи — с учетом продуктов горения и без их учета (тепловой эффект пожара). Методология моделирования реализуется на базе RANS моделей турбулентности либо с привлечением более сложных и детализированных LES-моделей [1].

Трехмерное моделирование используется для оценки пожаров в отдельных туннелях и горных выработках. Это связано с привлечением значительных вычислительных мощностей. Кроме того, развиваются одномерные сетевые модели и алгоритмы расчета для вентиляционных сетей произвольной сложности. В [14] предложен сетевой алгоритм расчета конвективного расслоения потоков в горных выработках. Его идея заключается в разделении ветви с пожаром на сеть ветвей, допускающую двунаправленное движение воздуха. В простейшем случае такая сеть представляет собой две параллельные ветви, соединенные множеством ветвей-перемычек. В [2, 3] разработан алгоритм расчета аэро- и термодинамических параметров воздуха в шахтных вентиляционных сетях произвольной топологии в условиях возникновения подземных пожаров. Его особенность — экономичный в плане времени метод расчета теплораспределения.

Важным и нерешенным до конца вопросом является параметризация таких моделей. Речь идет об определении временных зависимостей тепловой мощности источника для различных объектов возгорания [15] и характеристик вентиляционной сети в условиях пожара. В [16] эквивалентное аэродинамическое сопротивление горной выработки при наличии в ней конвективного расслоения существенно неоднородных по температуре потоков воздуха возрастает с ростом интенсивности теплового источника. Аналогичный вывод о росте аэродинамического сопротивления при увеличении интенсивности тепловыделений сделан в [17], однако количественные зависимости отличны от [16]. Эффективный коэффициент турбулентной диффузии, задаваемый в одномерной модели воздушного пространства горной выработки, в случае пожара также будет выше по причине необходимости учета более интенсивного массопереноса в конвективном вихре внутри горной выработки. По умолчанию принимается, что при пожаре в горных выработках справедлив закон Аткинсона:

$$H = RQ^2, \quad (2)$$

тепловой эффект от пожара описывается слагаемым тепловой депрессии:

$$H_t = \Delta\rho gh, \quad (3)$$

где H — перепад давления в выработке, Па; R — аэродинамическое сопротивление, $\text{Н с}^2/\text{м}^8$; Q — объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; H_t — тепловая депрессия, Па; $\Delta\rho$ — разница плотностей, $\text{кг}/\text{м}^3$; h — перепад высот, м.

Представляет интерес проверка данной гипотезы с привлечением методов вычислительной динамики жидкости и газа. С их помощью возможно проведение более полного теоретического исследования сложной структуры воздушных потоков, формирующейся при появлении интенсивных источников тепловыделений в наклонной выработке. Сопоставление результатов трехмерного моделирования и данных, полученных на одномерной сетевой модели (2)–(3), позволит сделать вывод о применимости последней. Такое сопоставление — конечная цель настоящей работы. Большое внимание уделено анализу особенностей рассчитанных полей скорости и температуры, определению критической мощности пожара при разных начальной депрессии горной выработки и углах ее наклона.

МЕТОДОЛОГИЯ

Анализ конвективных расслоений воздушных потоков в наклонной горной выработке должен проводиться на модели, в которой расход воздуха и перепад давления могут свободно меняться под воздействием тепловой депрессии. Наиболее простая модель, допускающая такие степени свободы, — параллельное соединение, представленное на рис. 1. Одна из параллельных ветвей наклонная (ветвь 2, в которой находится источник возгорания), вторая — горизонтальная (ветвь 3).

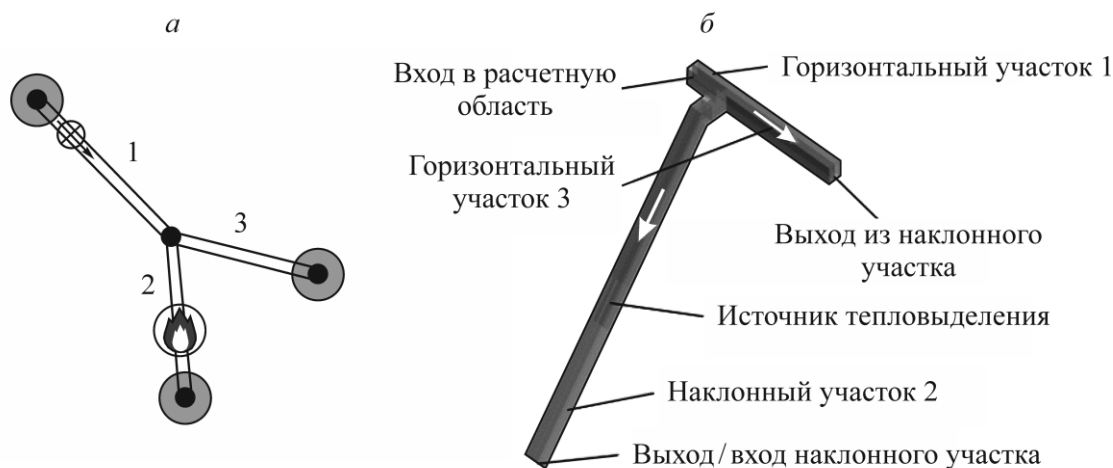


Рис. 1. Геометрическая модель в одномерной сетевой постановке (а) и в трехмерной (б)

Возникновение мощных тепловых депрессий из-за возгорания в наклонных выработках в первую очередь приводит к опрокидыванию потоков в контурах с наименьшей вариацией депрессии (в ближайших к источнику возгорания и относительно коротких контурах). В протяженных контурах, включающих в себя шахтные стволы и имеющих большие вариации депрессии, опрокидывание маловероятно. С учетом того, что наибольший интерес представляют ситуации зарождения возвратных потоков, выбор такой относительно простой модели участка рудничной вентиляционной сети обоснован.

На входе в ветвь 1 задается фиксированный расход воздуха, на выходе из ветвей 2 и 3 — нулевое избыточное давление. За счет возможности перераспределения фиксированного расхода воздуха между параллельными ветвями 2 и 3 в наклонной 2 может формироваться произвольный расход воздуха и произвольная депрессия. Начальная температура воздуха, входящего в домен, задавалась фиксированной и равной 20 °С.

Граничные условия для участков характеризуются связью системы с атмосферой. Отметим, что в одномерной постановке задачи присутствуют атмосферные ветви, обеспечивающие замыкание вентиляционного контура и баланс массы в системе. На рис. 1а они не приводятся.

Трехмерная модель параллельного соединения выработок строилась в модуле ANSYS DesignModeler. Поперечное сечение выработки представляет собой прямоугольник со сторонами 5 и 4 м. Длина наклонного участка 260 м, горизонтального — 140 м. Расстояние до сопряжения 40 м. Внутри наклонного участка расчетной геометрии располагалось тело, имитирующее источник интенсивного тепловыделения, с геометрическими размерами, которые соответствуют реальным размерам дизельной техники, применяемой на горнодобывающих предприятиях, например погрузчик Atlas Copco ST1030 размерами 9.8 × 2.3 × 2.4 м. Далее на геометрии строилась структурированная неоднородная сетка со сгущением вблизи твердых стенок для корректного расчета высоких градиентов скорости и температуры. Размер и количество пограничных слоев подбирались исходя из обеспечения требуемого значения $Y^+ \approx 1$. Сеточная сходимость исследовалась путем анализа вариации, перепада давления в наклонной выработке при разных начальных массовых расходах, поступающих в расчетную область в диапазоне 100–300 кг/с (таблица). Качество сетки оценивалось путем контроля параметров асимметрии и ортогональности элементов сетки.

Исследование сеточной сходимости модели

Размер элемента, м	Количество элементов, млн	Массовый расход на входе в расчетную область, кг/с					
		100		200		300	
		ΔP , Па	p , %	ΔP , Па	p , %	ΔP , Па	p , %
0.40	1.09	53.90	—	120.00	—	215.30	—
0.30	2.05	46.80	– 13	105.30	– 12	187.20	– 13
0.25	3.12	48.30	+ 3	107.60	+ 2	191.70	+ 2
0.20	5.21	46.50	– 4	104.70	– 3	185.60	– 3

Примечание. ΔP — перепад давлений; p — отклонение от предыдущего значения.

Из таблицы видно, что при изменении элемента сетки от 0.30 до 0.25 м вариация перепада давления в исследуемой области составляет не более 3 % для всего диапазона принятых скоростей. Для дальнейших расчетов выбрана сетка с размером элемента 0.25 м, количество элементов расчетной области 3.12 млн.

Численное решение осуществлялось в модуле Fluent программного комплекса ANSYS. Использовался алгоритм SIMPLE [18]. Пространственная дискретизация проводилась с помощью схем второго порядка точности для переменных энергии, давления и скорости, а также первого порядка точности для турбулентных характеристик потока.

Расчет турбулентных характеристик потока осуществлялся с помощью RANS модели турбулентности SST k - ω . Уравнения переноса турбулентных характеристик потока (кинетической энергии турбулентности и удельной скорости диссипации турбулентной энергии) использовались для замыкания системы балансовых уравнений массы, импульса и энергии. Для учета переменности плотности воздуха применялось уравнение идеального газа. Воздух считался однородной средой, а динамика продуктов горения не рассматривалась в задаче. Это связано с тем, что в настоящем исследовании изучается только тепловой эффект от действующего пожара. При рассмотрении конкретных практических ситуаций возгорания в горных выработках в более строгой постановке учет продуктов горения может оказаться очень важным. Однако расход продуктов горения будет зависеть от конкретного типа горячей техники [19]. Анализ только теплового эффекта с одной стороны является упрощением, с другой — позволяет обобщить выводы о характере тепломассопереноса при наличии мощных источников тепловыделения. В результате такая постановка имеет научный и практический интерес.

Задача решалась в полностью нестационарной постановке. Использовались адаптивные временные шаги по критерию минимизации числа Куранта в процессе расчета. Верхняя граница временного шага составляла 0.1 с, нижняя — 0.005 с. Мощность источника тепловыделения задавалась линейной интервальной функцией. При моделировании первые 10 с мощность равнялась нулю, далее за 20 с происходило равномерное возрастание до заданного значения тепловыделения, которое сохранялось до конечного момента времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе проведен анализ временных зависимостей параметров воздуха по мере развития пожара. Выполнена серия расчетов для различной мощности тепловыделения от 1 до 10 МВт при начальных расходах воздуха в горизонтальном участке от 100 до 400 кг/с. Расчеты выполнялись для разных углов наклона ветви 2: 5, 10 и 15°. Для каждой из вариаций начального расхода воздуха выполнялся расчет при мощности источника тепловыделения, равной 0 МВт, с целью установки распределения расходов воздуха в выработках без нагрева. Полученное распределение расходов принималось в качестве начального приближения для дальнейшего нестационарного расчета. Моделирование воздушораспределения на указанном диапазоне входных параметров задачи показало, что по истечении около 1–2 мин поток воздуха выходит на стационарный режим, после чего его параметры больше не меняются. Максимальное время, необходимое для выхода модели на стационарный режим, в рассматриваемом диапазоне параметров задачи составило 140 с.

На рис. 2 представлены кривые, характеризующие изменение массового расхода воздуха на выходе из наклонной ветви 2 и на выходе из горизонтальной ветви 3 при фиксированном расходе воздуха 100 кг/с на входе в систему. С начала нагрева во временном интервале 10–30 с происходит увеличение расхода воздуха. Далее объем нагретого воздуха в пределах наклонного участка возрастает, что приводит к появлению существенной тепловой депрессии, направленной депрессии наклонной выработки в нормальном режиме проветривания. Наличие тепловой депрессии приводит к постепенному уменьшению массового расхода на выходе из наклонной выработки и увеличению расхода в параллельной ей горизонтальной выработке. Если тепловая депрессия превышает критическое значение (см. рис. 2), происходит изменение направления движения воздуха в наклонной выработке. После опрокидывания направления движения воздушного потока массовый расход выходит на стационарное значение для всех трех граничных поверхностей и расчет считается завершенным.

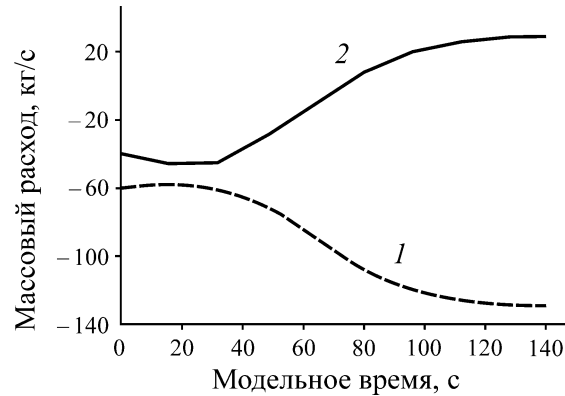


Рис. 2. Временная зависимость массового расхода в наклонной горной выработке: 1 — выход горизонтального участка; 2 — выход наклонного участка

Далее внимание сосредотачивалось на анализе закономерностей стационарного распределения воздуха, определенного в конечный момент времени. Конечный момент времени, равный 140 с, задавался с учетом условия расходов воздуха на стационарные значения для всего диапазона исследованных параметров задачи.

На рис. 3 представлены эпюры осевой компоненты вектора скорости воздушного потока в срединном вертикальном сечении выработки (рассмотрен случай угла наклона 10° и массового расхода воздуха 300 кг/с). По эпюрам условно проведена граница вихревой структуры. Границей вихревой структуры принимается сечение наклонного участка горной выработки, для которого векторы скорости однонаправленны. Под вихревой структурой понимаются участки продольного сечения горной выработки с разнонаправленным движением воздушного потока. Для рассматриваемого случая (рис. 3), критическая мощность, при которой происходит изменение направления движения воздушного потока, составляет 5.5 МВт.

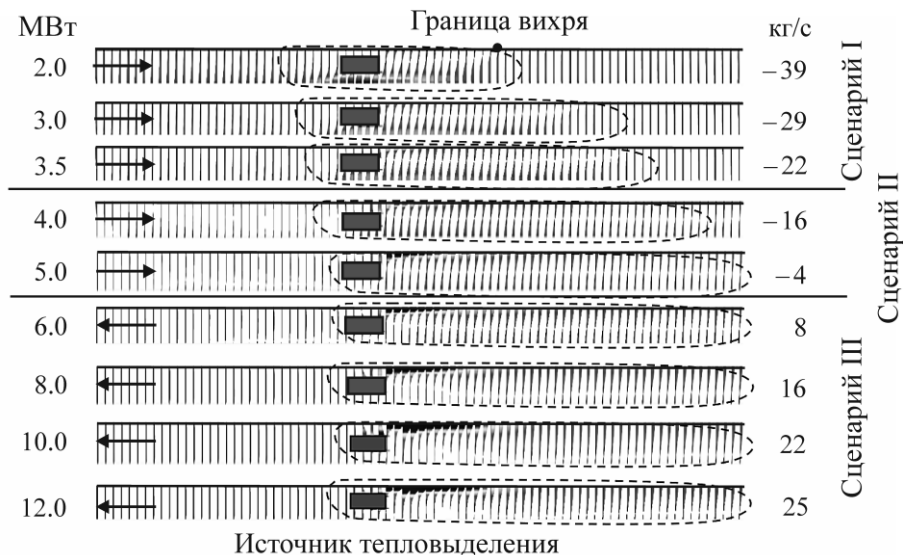


Рис. 3. Эпюры осевой компоненты вектора скорости воздушного потока в различных сечениях наклонной горной выработки при разной тепловой мощности пожара

На основании данных рис. 3, можно выделить три сценария движения воздушного потока в наклонной выработке при различной интенсивности теплового источника:

I. Движение воздушного потока без изменения изначального нисходящего направления с относительно малой зоной конвективного вихря, не выходящей за пределы наклонной выработки.

II. Движение воздушного потока без изменения изначального нисходящего направления, с протяженной зоной конвективного вихря. Вихревая зона выходит за пределы наклонного участка выработки и заканчивается на сопряжении с горизонтальным участком. Формируются два разнонаправленных потока: поток нагретого воздуха от сопряжения с горизонтальным участком до источника нагрева и холодный поток условно свежего воздуха от сопряжения до источника тепловыделения. Средний расход воздуха в сечениях, ниже источника тепловыделения, стремится к нулю, но еще не достигает этого значения.

III. Изменение направления движения воздушного потока на восходящий. Сохраняется вихревая структура, замыкающаяся на сопряжении с горизонтальным участком аналогично предыдущему сценарию. Однако зона с нисходящим течением в данном случае значительно меньше, чем зона с восходящим потоком воздуха.

Для любого сценария при нагреве воздуха в пределах наклонной выработки характерны вихревые структуры с разнонаправленным движением. В сечениях с разнонаправленным движением воздушных потоков значительно увеличивается расход воздуха, что увеличивает перепад давления в выработке относительно нормального режима течения. В данном случае вихревая структура выступает в качестве местного сопротивления, тем самым повышая общее аэродинамическое сопротивление наклонного участка.

На рис. 4 приведены зависимости перепада давления в наклонном участке от интенсивности тепловыделения. Изменение знака перепада давления характеризует точку интенсивности тепловыделения, в которой меняется направление движения воздушного потока в наклонном участке. Для каждого из рассматриваемых начальных расходов воздуха в расчетной модели существует такая критическая мощность источника тепловыделения, при которой входящий в выработку расход воздуха равен нулю.

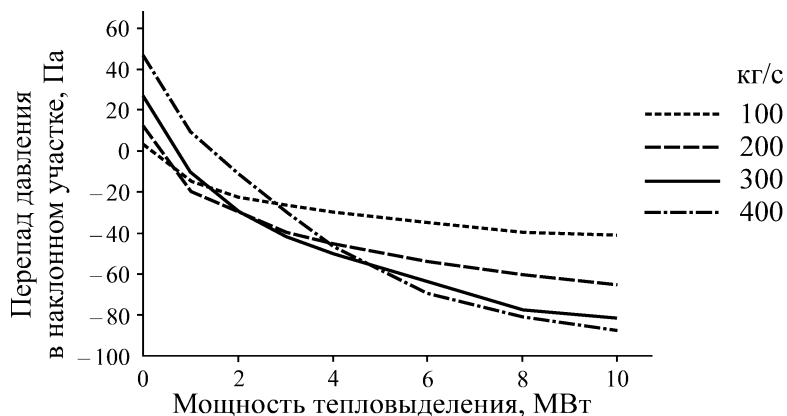


Рис. 4. Зависимость перепада давления в наклонном участке при угле наклона 10° от мощности источника тепловыделения

Для каждого из рассмотренных начальных расходов воздуха, подаваемого в расчетную область, можно определить критическую мощность. Зависимость критической мощности от начального перепада давления воздуха представлена на рис. 5. Кривые хорошо аппроксимируются полиномом второй степени $y = ax^2 + bx + c$ (y — требуемая для изменения направления движения воздушного потока тепловая мощность, x — начальный перепад давления в выработке).

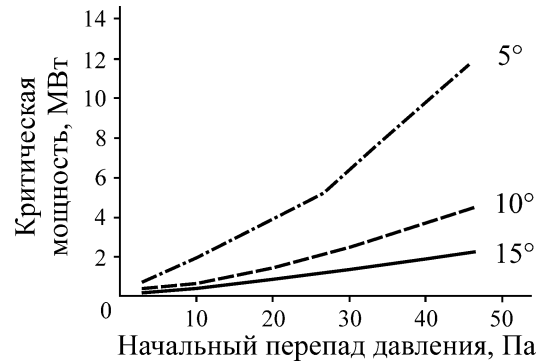


Рис. 5. Зависимость критической мощности источника тепловыделения от перепада давления в наклонном участке при разных углах наклона выработки

Ниже для трех кривых с помощью метода наименьших квадратов определены коэффициенты для аппроксимирующей функции критической мощности:

Коэффициент	$\theta = 5^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 15^\circ$
a	0.00247	0.00127	0.000283
b	0.11100	0.03310	0.034400
c	0.49600	0.23900	0.093300

Если аппроксимировать зависимости коэффициентов a , b , c от угла θ степенной функцией, то получим итоговую зависимость для критической мощности. Она определяет изменения направления движения воздушного потока для произвольного угла наклона горной выработки при разных начальных перепадах давления:

$$W_k = \frac{0.0192\Delta P^2 + 0.8334\Delta P + 3.87}{\theta^{1.3}}, \quad (4)$$

где ΔP — перепад давления в выработке.

Формула (4) справедлива для выработок с соответствующей формой и площадью сечения. Выработки площадью 16 м^2 и сторонами 4 на 5 м характерны для транспортных съездов медно-никелевых и алмазодобывающих рудников.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛЬЮ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Важно проанализировать зависимости перепада давления в наклонной выработке от массового расхода в ней (рис. 6а) для разных мощностей тепловыделений.

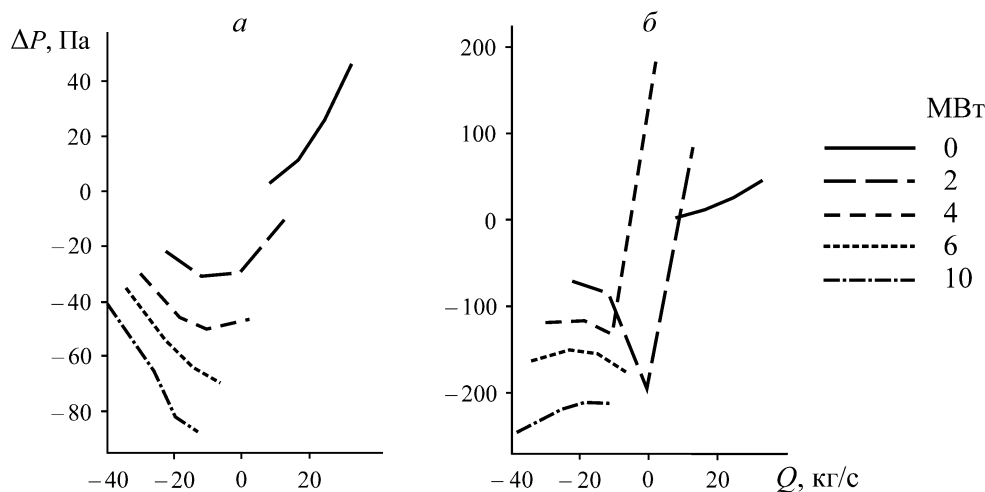


Рис. 6. Зависимость перепада давления в наклонной выработке от массового расхода в ней

На рис. 6б представлены аналогичные зависимости $\Delta P(Q)$, полученные в рамках одномерной сетевой постановки [20, 21] по формуле, для которой давление приведено к единой высотной отметке относительно случая $W = 0$ МВт:

$$\Delta P = R_2 Q_2 |Q_2| + \Delta \rho_2 g L_2 \sin \theta,$$

где R_2 — массовое аэродинамическое сопротивление [17] ветви 2, 1/(м·кг); $\Delta \rho_2$ — изменение плотности воздуха в ветви 2, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; L_2 — длина горной выработки, м.

При нулевой мощности тепловыделений зависимость $\Delta P(Q)$ представляет собой параболу, отражающую закон Аткинсона для однонаправленного турбулентного течения воздуха в горных выработках. Однако при увеличении мощности тепловыделений отрицательные расходы и давления на рис. 6 указывают на то, что большая часть воздушного потока изменила направление движения.

В области отрицательных расходов и давлений зависимость $\Delta P(Q)$ во всех случаях отличается от параболической. В случае одномерной модели это связано только с действием второго слагаемого справа в (4). Однако кривые $\Delta P(Q)$ в одномерной модели получаются более пологими по сравнению с данными трехмерного численного моделирования. Если в одномерной модели в рассматриваемом диапазоне параметров при увеличении расхода воздуха в ветви прирост потерь давления на аэродинамических сопротивлениях практически компенсируется уменьшением тепловой депрессии, то в трехмерном случае рост тепловой депрессии оказывается доминирующим фактором. Причиной этому может быть некорректный учет R_2 и $\Delta \rho_2$ в одномерной модели. Кроме того, одномерная модель дает завышенные значения перепада давления в наклонной горной выработке после опрокидывания воздушной струи.

В [17] показано, что с ростом температуры в выработке ее эффективное аэродинамическое сопротивление растет. Значит, учет этого фактора приведет к дополнительному снижению перепада давления с уменьшением расхода воздуха в выработке. Это позволит в рамках модели (4) лучше отразить угол наклона кривых $\Delta P(Q)$ в области отрицательных значений, но не решит проблему. Корректировка множителя $\Delta \rho_2$ более трудоемкая задача, так как требуется понимание реального распределения температуры в наклонной выработке, при этом распределение температур будет существенно зависеть от расхода воздуха.

Для достижения соответствия численной и аналитической кривой на рис. 6 для $W = 10$ МВт требуется предположить, что $\Delta \rho = -0.67 + 0.0176Q$ (знак “–” указывает на то, что плотность уменьшается из-за разогрева воздуха). Зависимость перестает быть физической при $Q > 39$ кг/с, так как она меняет знак. В то же время данные численного трехмерного моделирования указывают на то, что при $W = 10$ МВт средняя плотность воздуха в наклонной выработке с ростом массового расхода Q меняется иначе — по сложному, нелинейному закону и имеет диапазон значений 0.82–0.96 кг/м³. Следовательно, в рамках модели (4) аэродинамическое сопротивление наклонной выработки должно быть задано как функция расхода воздуха для корректного описания интегральных аэродинамических характеристик (массовый расход, депрессия) в условиях конвективного расслоения потоков. Представляет интерес проведение дальнейших исследований по определению аналитической функции аэродинамического сопротивления от параметров выработки, системы вентиляции и источника тепловыделения.

ВЫВОДЫ

В условиях конвективного расслоения потоков в наклонной горной выработке из-за наличия источника тепловыделения по прошествии некоторого времени формируется стационарный режим течения воздуха, который в дальнейшем не меняется. Найдена зависимость критической мощности тепловыделений от угла наклона горной выработки и начального перепада давления в ней. В условиях действия интенсивных источников тепловыделения в наклонной горной выработке описание воздухораспределения в рамках одномерной постановки требует привлечения эмпирических зависимостей аэродинамического сопротивления и средней плотности воздуха от его расхода. Результаты получены для горной выработки прямоугольного поперечного сечения площадью 16 м^2 , диапазона расходов воздуха $100 - 400 \text{ кг/с}$ и углов наклона выработки $5 - 15^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salami O. B., Xu G., Kumar A. R., and Pushparaj R. I. Underground mining fire hazards and optimization of emergency evacuation strategies: The issues, existing methodology and limitations, and way forward, *Process Safety Env. Protection*, 2023, Vol. 177. — P. 617–634.
2. Левин Л. Ю., Палеев Д. Ю., Семин М. А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // *Вестн. научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. — 2020. — № 1. — С. 81–85.
3. Попов М. Д., Кормщиков Д. С., Семин М. А., Левин Л. Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе “Аэросеть” // *Безопасность труда в пром-сти*. — 2020. — № 10. — С. 24–32.
4. Zhou L. and Smith A. C. Improvement of a mine fire simulation program — incorporation of smoke rollback into MFIRE 3.0, *J. Fire Sci.*, 2012, Vol. 30, No. 1. — P. 29–39.
5. Oka Y. and Atkinson G. T. Control of smoke flow in tunnel fires, *Fire Safety J.*, 1995, Vol. 25, No. 4. — P. 305–322.
6. Edwards J. C., Franks R. A., Friel G. F., and Yuan L. Experimental and modeling investigation of the effect of ventilation on smoke rollback in a mine entry, 2005. — P. 1–6.
7. Василенко В. И. Принципы, критерии, алгоритмы управления проветриванием и устойчивость вентиляционных струй при авариях в шахте // *Горн. журн.* — 2010. — № 8. — С. 42–46.
8. Костеренко В. Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольных шахт // *ГИАБ*. — 2011. — № 6. — С. 373–377.
9. Adjiski V. Possibilities for simulating the smoke rollback effect in underground mines using CFD software, *GeoSci. Eng.*, 2014, Vol. 60, No. 2. — P. 8–18.
10. Meng N., Liu B., Li X., Jin X., Huang Y., and Wang Q. Effect of blockage-induced near wake flow on fire properties in a longitudinally ventilated tunnel, *Int. J. Thermal Sci.*, 2018, Vol. 134. — P. 1–12.
11. Huang Y., Li Y., Dong B., Li J., and Liang Q. Numerical investigation on the maximum ceiling temperature and longitudinal decay in a sealing tunnel fire, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2018, Vol. 72. — P. 120–130.
12. Кин А. И., Лисаков С. А., Сидоренко А. Ю., Сидоренко А. И., Сыпин Е. В. Компьютерное моделирование пожара в конвейерной выработке угольной шахты // *Южно-Сибирский научн. вестн.* — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 83–94.

- 13. Кобылкин С. С., Каледина Н. О., Кобылкин А. С.** Моделирование влияния ветра и температуры воздуха на распределение токсичных газов и дыма при пожаре на метромосту // ГИАБ. — 2022. — № 11. — С. 147–162.
- 14. Stewart C. M., Aminossadati S. M., and Kizil M. S.** Underground fire rollback simulation in large scale ventilation models, 15th North American Mine Ventilation Symp., 2015. — P. 1–8.
- 15. Hansen R.** Proposed design fire scenarios for underground hard rock mines, J. Sustainable Min., 2022, Vol. 21, No. 4. — P. 261–277.
- 16. Hu D., Li Z., Wang H., Xu H., and Miao C.** Smoke dispersion test and emergency control plan of fire in mine roadway during downward ventilation, Scientific Reports, 2023, Vol. 13, No. 1. — 3683.
- 17. Шалимов А. В., Попов М. Д.** Влияние тепловых факторов на величину аэродинамического сопротивления горной выработки // Горн. эхо. — 2023. — № 3. — С. 142–148.
- 18. Versteeg H. K. and Malalasekera W.** An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson Education, 2007. — 503 p.
- 19. Hansen R.** Study of heat release rates of mining vehicles in underground hard rock mines, Doctoral dissertation, Mälardalen University, 2015.
- 20. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В.** Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 154–161.
- 21. Шалимов А. В.** Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 84–92.

Поступила в редакцию 06/X 2023

После доработки 23/V 2024

Принята к публикации 27/VI 2024