

УДК 622.4

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА
В СИСТЕМЕ ШАХТНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

Ж. Айтао, К. Ванг

*Школа минеральных ресурсов и безопасных технологий,
Горно-технологический университет, E-mail: safety226@126.com,
Beijing 100083, г. Пекин, Китай*

Исследована устойчивость воздушного потока вентиляционной выработки с учетом давления газовой вентиляции. Изучено формирование и определены характеристики давления газовой вентиляции в случае застоя воздушного потока на угольной шахте Таншань (Китай). Выполнены полевые испытания, численное моделирование, экспериментальные исследования с целью подтверждения влияния давления газовой вентиляции на устойчивость воздушного потока в вентиляционной выработке. Установлено, что давление газовой вентиляции формируется в наклонных вентиляционных штреках при скоплении газа, которое можно рассматривать как прирост давления естественной тяги. Давление газовых потоков может вызвать застой или реверсирование потока воздуха в вентиляционных штреках с относительно малой скоростью воздушного потока. Для обеспечения устойчивого воздушного потока необходимо управление системой вентиляции шахты с поддержанием высокой скорости воздушного потока особенно в вентиляционных выработках с эмиссией газа и исключением проходки вентиляционных выработок с большим углом наклона.

Скопление газа, давление газовой вентиляции, устойчивость воздушного потока, система подземной вентиляции

DOI: 10.15372/FTPRPI20180115

Система вентиляции — важный элемент структуры подземной шахты. Она обеспечивает доступ достаточного количества воздуха в подземные шахтные выработки для снижения концентрации метана и других опасных газовых компонентов [1, 2], для поддержания надлежащих производственных условий и предупреждения экстремальных ситуаций. Вентиляция угольной шахты представляет собой сложную систему с большим количеством факторов, способных оказывать влияние на ее поведение [3, 4]. Этими факторами могут быть геометрия вентиляционной сети (диагональная сеть, сопротивление воздушных каналов и т. д.), местоположение и рабочие характеристики вентиляторов в системе [5]. Давление естественной тяги — существенный внешний фактор влияния, который известен и учитывается со времени начала подземной разработки месторождений. Давление естественной тяги в подземной шахте может способствовать оптимизации структуры системы вентиляции, снижению энергоемкости и уменьшению

Исследования проведены при финансовой поддержке Государственной программы фундаментальных исследований Китая (2016YFC0801402, 2016YFC0600708), Национального фонда естественных наук Китая (51474219).

рисков скопления газов и токсичных компонентов [6]. Однако оно может создавать реверсивный поток воздуха или снижать скорость потока воздуха в некоторых вентиляционных выработках в системе вентиляции шахты. Давление естественной тяги создается при разности плотности воздуха во входных и исходящих вентиляционных выработках [7–10].

Разность плотности воздуха определяется температурой воздуха и перепадом уровней вентиляционной выработки. Следовательно, давление естественной тяги всегда присутствует в вентиляционных выработках с перепадом высот и температур [11–14]. Например, в случае пожара в подземной шахте дым перемещается в направлении воздушного потока в вентиляционной выработке с соответствующим увеличением температуры воздуха по мере распространения дыма. Таким образом, огонь создает давление естественной тяги, если вентиляционная выработка имеет перепад высот. Однако такое давление будет в вентиляционных выработках еще и при скоплении газа.

В настоящей работе вводится термин “давление газовой вентиляции”. Как исследователи, так и практики-профессионалы часто не учитывают давление газовой вентиляции, тем не менее это явление имеет важное значение для устойчивости воздушного потока в вентиляционных выработках подземной шахты. Оно может привести к застою воздуха или создать реверсивный поток воздуха в поперечных вентиляционных выработках. Например, на угольной шахте Таншань произошел случай прекращения подачи воздуха через вентиляционную выработку в одном из наклонных вентиляционных штреков. Первоначально причиной аварии считали обрушение кровли, но детальное обследование аварийного участка позволило уточнить причину: авария была вызвана скоплением газа.

Цель данного исследования — изучить механизм воздействия давления газовой вентиляции на устойчивость потока воздуха в вентиляционной выработке, разработать средства предупреждения экстремальных ситуаций и дать рекомендации по проектированию шахтных систем вентиляции.

ФОРМИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Давление газовой вентиляции вызвано скоплением газа и может рассматриваться как одна из форм давления естественной тяги. Величина такого давления зависит от концентрации газа и перепада высот вентиляционной выработки. Температура не рассматривается как фактор влияния в случае наличия высокой концентрации газа, скопившегося в вентиляционной выработке. Поскольку плотность метана ниже плотности воздуха, плотность газовой смеси изменяется. Более того, при наличии перепада высот в вентиляционной выработке формируется давление газовой вентиляции, которое можно вычислить из уравнения

$$h_M = (\bar{\rho} - \rho_a)[z(0) - z(L)]g, \quad (1)$$

где h_M — давление газовой вентиляции в вентиляционной выработке, Па; $\bar{\rho}$ — средняя плотность потока воздуха в вентиляционной выработке после смешивания с газом, кг/м^3 ; ρ_a — плотность воздуха, кг/м^3 ; $z(0)$, $z(L)$ — высоты разветвления в начальной и конечной секциях соответственно, м.

Давление газовой вентиляции пропорционально перепаду высот $z(0) - z(L)$ вентиляционной выработки; при росте значения $z(0) - z(L)$ давление газовой вентиляции увеличивается. В горизонтальной вентиляционной выработке при отсутствии перепада высот давление газовой вентиляции может отсутствовать, но всегда существует в наклонной или вертикальной вентиляционных выработках при наличии высокой концентрации газа. Давление газовой вентиляции зависит от концентрации газа. Газовая смесь имеет меньшую плотность воздуха в связи с при-

сутствием метана в воздушном потоке. При повышенной концентрации газа давление газовой вентиляции выше, при нулевой концентрации давление газовой вентиляции исчезает. При $z(0) > z(L)$ давление газовой вентиляции имеет отрицательное значение и направлено в противоположном направлении относительно воздушного потока главного вентилятора. При $z(0) < z(L)$ давление газовой вентиляции имеет положительное значение и совпадает с направлением потока главного вентилятора.

Давление газовой вентиляции подобно термопадению вентиляционного давления, которое может изменять направление воздушного потока в вентиляционной выработке и таким образом нарушать воздушный поток в шахте. Поскольку давление газовой вентиляции зависит от перепада высот, разная направленность воздушного потока (вверх и вниз) в наклонной и вертикальной вентиляционных выработках по-разному влияет на устойчивость воздушного потока в вентиляционной выработке.

Метан скапливается в вверх направленном воздушном потоке. Поскольку плотность метана ниже плотности воздуха при идентичных условиях, плотность газовой смеси можно выразить в виде $\rho = (\rho_m - \rho_a)C + \rho_a$ в случае появления метана в вентиляционной выработке. Очевидно, что $\rho - \rho_a < 0$, где ρ_m и ρ_a — плотность метана и воздуха соответственно; C — концентрация метана. Поскольку $z(0) - z(L) < 0$ при условии вверх направленной вентиляции, можно получить $h_M > 0$ из расчета давления газовой вентиляции. В этом случае направление давления газовой вентиляции, создаваемое в вентиляционной выработке, совпадает с направлением потока вентилятора и усиливает вентиляцию. Одновременно скорость воздушного потока в вентиляционной выработке обычно возрастает, в то время как в других выработках снижается. Когда давление газовой вентиляции в вентиляционной выработке достигает критического значения, воздушный поток в других выработках реверсирует и затягивает поток метана в воздушный поток, перемещающийся в других вентиляционных выработках.

Метан скапливается во вниз направленном воздушном потоке. При условии вниз направленной вентиляции, т. е. при $z(0) - z(L) > 0$, на основе расчета давления газовой вентиляции получаем $h_M < 0$. В этом случае направление давления газовой вентиляции, формируемой в вентиляционной выработке, противоположно направлению работы вентилятора в вентиляционной выработке и препятствует процессу вентиляции. Одновременно скорость воздушного потока в вентиляционной выработке снижается, в то время как в других выработках возрастает. Когда давление газовой вентиляции в выработке достигает критического значения, воздушный поток реверсирует и появляется возможность перемещения метана с реверсивным воздушным потоком по другим вентиляционным выработкам.

ПРИМЕР ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Угольная шахта Таншань в Китае — одна из старейших шахт со 130-летней историей. Добыча угля продолжается на участке “Yuechi” на западной границе угольной шахты. Вентиляционные выработки c и e — это два наклонных вентиляционных штрека, пройденных в угольном пласте под углом 30° и соединенных вентиляционными выработками d и k . Глубина проходки вентиляционной выработки k — 526.7 м, d — 451.8 м. Два штрека представляют собой вентиляционную систему с максимальным расходом воздушного потока $6 \text{ м}^3/\text{с}$. Концентрация метана в обратном потоке равна 0.35%. Вентиляционное окно предусмотрено в вентиляционной выработке k . Упрощенная система вентиляции представлена на рис. 1.

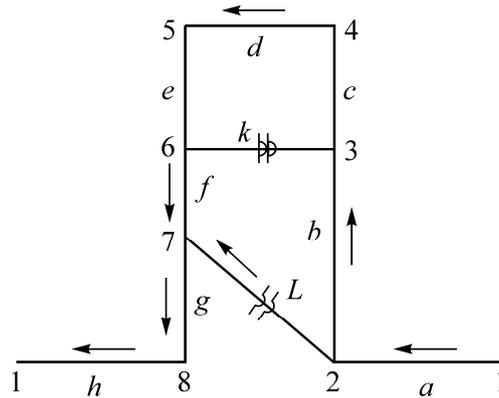


Рис. 1. Упрощенная система вентиляции

Описание аварии: регулятор L в вентиляционной выработке оказался случайно открытым, что обеспечило высокую скорость вентиляционного воздушного потока между секциями 2 и 7. При отсутствии потока вентиляционного воздуха в выработке c концентрация метана в выработке k возросла более чем на 10%. Регулятор в выработке L вернулся в нормальное рабочее состояние. Однако в выработке c все еще не было течения вентиляционного воздуха. В ходе исследования причины этого проведена проверка концентрации метана в вентиляционных выработках b , c , e и f . Концентрация метана превышала 10% в точке 20 м над переходом 6 и 40 м над переходом 3. Проверку выше этой отметки не проводили из соображений безопасности. Застой вентиляционного потока объяснили обрушением подошвы на участке вентиляционного штрека d . Локальная вентиляционная система была разрушена, газ скопился в вентиляционной выработке, в которой отсутствовал поток воздуха. На основании этого предположения введен в действие вспомогательный вентилятор для удаления скопившегося газа. Приблизительно через 24 ч скорости воздушных потоков в выработках d и c достигли нормального значения. Остаточный газ в верхней части был незамедлительно удален, но в вентиляционных штреках остались участки с повышенной концентрацией газа.

Эта авария привела к последствиям двух видов. Во-первых, в вентиляционных выработках c и d возник застой вентиляционного потока после того, как регулятор в вентиляционном штреке L начал работать в стандартном режиме. Однако во время работы вспомогательного вентилятора внезапно произошло снижение газа и воздушный поток восстановился до уровня расчетных параметров. Во-вторых, концентрация газа, скопившегося в вентиляционных выработках c и d за очень короткий промежуток времени, была очень высокой.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для изучения этих последствий созданы натурные условия исходя из описания аварии (рис. 1). Методика натурных испытаний: регулятор в вентиляционной выработке L был закрыт. Сделаны замеры скорости воздушного потока механическим анемометром с точностью измерения 0.1 м/с и концентрации метана оптическим детектором с точностью 0.1%, а также статического давления в вентиляционных выработках b и c цифровым барометром с точностью измерения 1 Па. Затем регулятор в вентиляционной выработке L был открыт, выполнены измерения этих же параметров с интервалом в 1 мин.

Регулятор в вентиляционной выработке L был открыт с 9:30 до 9:46. За этот период скорость воздушного потока в вентиляционных выработках c и e снизилась, концентрация газа над вентиляционной выработкой k быстро возросла. Это подтвердило предположение, что накопление газа зависит от положения регулятора.

Анализ экспериментальных результатов показал, что в открытом положении регулятора L расход воздуха в выработке c снизился с 5.4 до 2.8 м³/с, давление в интервале между секциями 3 и 6 упало с 36 до 10 Па, концентрация газа в вентиляционной выработке f повысилась с 0.5 до 0.7%. Однако, когда регулятор был в закрытом положении в 9:46, концентрация газа снизилась с 0.7 до 0.3%. Следовательно, скорость воздушного потока и накопление газа в вентиляционном выработке f тесно связаны с положением регулятора в выработке L , что соответствует ситуации во время аварии.

Согласно описанию аварии и натурных испытаний, снижение скорости воздушного потока и скопление газа инициированы при открытом положении регулятора в вентиляционной выработке L . При закрытом положении регулятора скорость воздушного потока в выработке c оставалась равной нулю, и не обрушение подошвы стало причиной этому. Значит, застой воздушного потока в выработке можно связать с накоплением газа над вентиляционной выработкой k .

Как уже указывалось, давление газовой вентиляции имеет важное значение для устойчивости воздушного потока в вентиляционной выработке, которая определяется концентрацией газа и перепадом высот. Более того, устойчивость воздушного потока имеет отношение к давлению в сети.

Поскольку вентиляционные выработки c и e находятся на самом отдаленном участке угольной шахты, падение давления на участке между секциями 3 и 6 составляет приблизительно 36 Па. Таким образом, устойчивость воздушного потока вентиляционного участка низка. Существует большой перепад высот между секциями 3 и 4; высота секции 3 — 526.7 м, а высота секции 2 — 451.8 м, в результате чего перепад высот равен 74.9 м. Согласно описанию аварии, метан накапливался в вентиляционных выработках c и e до уровня высокой концентрации: 10 и 20% соответственно при предположительной плотности воздуха 1.2 кг/м³ и плотности метана 0.72 кг/м³. Подставляя эти данные в уравнение (1), определяем давление газовой вентиляции в ветви, равное 35.9 Па.

Устойчивость вентиляционного потока зависит не только от давления газовой вентиляции, но также от падения давления в ветви. Если направление давления газовой вентиляции противоположно нормальному направлению воздушного потока, то давление газовой вентиляции ниже величины падения давления в сети и скорость воздушного потока в ветви снижается или воздушный поток реверсируется. Если давление газовой вентиляции равно падению давления в сети, то скорость воздушного потока снижается до нуля.

В стандартном состоянии вентиляции падение давления составляет 36 Па, т. е. близко давлению газовой вентиляции. В этом случае скорость воздушного потока в вентиляционных выработках c и e может быть равна нулю.

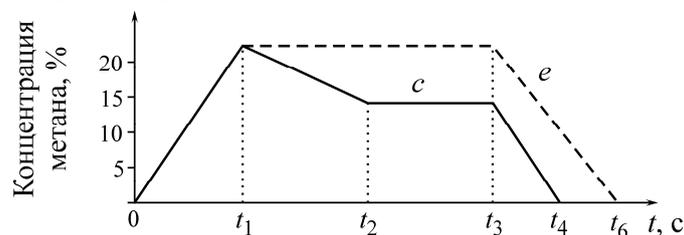


Рис. 2. Профиль распределения концентрации метана в вентиляционных выработках c и e

На практике при открытом положении регулятора в вентиляционном штреке L концентрация метана в вентиляционных выработках c и e динамично меняется под влиянием падения давления в ветви (рис. 2). Можно выделить 4 стадии состояния метана в вентиляционных выработках c и e . В период от нуля до t_1 скорость воздушного потока в выработках снижается, потому что регуля-

тор открыт и метан накапливается до уровня высокой концентрации. В момент t_1 регулятор в вентиляционном штреке L закрыт, метан в выработке c проталкивается к выработке e , содержание метана в выработке c снижается постепенно, а в выработке e — медленно. Однако благодаря постоянному поступлению метана из выработки c , количество метана в выработке e остается почти неизменным. В период с t_2 до t_3 давление газовой вентиляции и падение давления в ветви достигают равновесного состояния и концентрация метана в выработках c и e остается неизменной, а скорость воздушного потока равна нулю. В момент t_3 используют вспомогательный вентилятор, в результате чего содержание метана снижается в обеих выработках, но в выработке c оно снижается более интенсивно и исчезает.

Итак, основная причина появления метана — это поломка регулятора, что свидетельствует о несовершенном управлении системой вентиляционного оборудования. Кроме того, вентиляционная система отдаленного участка подвержена нарушениям. И наконец, вентиляционные выработки c и e имеют большой уклон и более высокое выделение газа, т. е. основные факторы формирования давления газовой вентиляции.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Для дальнейшего анализа устойчивости вентиляционного воздушного потока при условии скопления газа давление газовой вентиляции интерпретировали с помощью программы расчета неустойчивой вентиляции [15], выполнив численное моделирование. Начальные условия для моделирования приведены в таблице. Концентрация метана в выработках c , d и e была 60, 100 и 60 % соответственно, в других вентиляционных выработках она равна 0. Плотность метана 0.72 кг/м^3 , плотность воздуха 1.29 кг/м^3 , вентилятор установлен в выработке h , давление вентилятора 1735 Па.

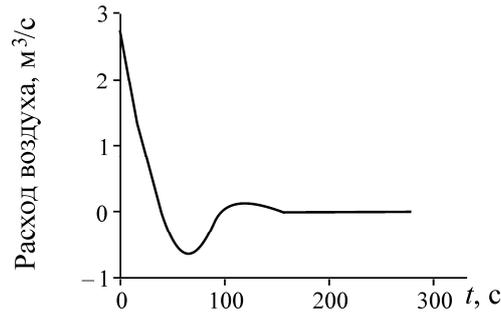
Параметры численного моделирования давления газовой вентиляции

Направление воздушного потока между секциями		Сопротивление, $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$	Длина, м	Площадь, м^2	Контур, м	Концентрация метана, %	Перепад высот, м
от	до						
1	2	4.3588	1500	10	13	0	0.0
2	3	2.7605	1050	10	13	0	-133.0
2	7	0.3204	656	10	13	0	-110.0
3	4	0.6102	110	10	13	0.6	-75.0
4	5	0.0581	20	10	13	1.0	0.0
5	6	0.5231	80	10	13	0.6	75.0
6	7	0.4184	244	10	13	0	23.0

На основе исходных условий получены решения для начальной скорости вентиляционного воздушного потока в каждой вентиляционной выработке. Результаты моделирования соответствуют результатам полевых испытаний:

Вентиляционная выработка	A	b	L	c	d	e	F	g	H
Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	12.8	2.7	10.0	2.7	2.7	2.7	2.7	12.6	12.6

Распределение расхода воздуха в вентиляционной выработке c показано на рис. 3. Когда регулятор в вентиляционной выработке L находится в открытом положении, метан скапливается в выработках c , d и e и препятствует воздушному потоку. Расход воздуха в выработке c , рассчитанный по программе, равен $2.7 \text{ м}^3/\text{с}$. Это значение немного колеблется, но через короткий промежуток времени конечная скорость воздушного потока снижается и остается на нулевом уровне. Результаты моделирования хорошо согласуются с описанием случая из практики и результатами полевых испытаний.

Рис. 3. Распределение расхода воздуха в выработке c после скопления газа

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования роли давления газовой вентиляции в устойчивости воздушного потока создана экспериментальная установка. Отношение геометрического подобия эксперимента составляет $1 : 50$, основная сила — давление газовой вентиляции, представляющее собой разность плотностей газа и воздуха. Отсюда число Фруда Fr рассматривается сначала при определении отношения динамического подобия и может быть выражено в виде

$$Fr = \frac{v^2}{gl}, \quad (2)$$

где g — ускорение гравитации; l — длина; v — скорость.

Поскольку отношение геометрического подобия составляет $1 : 50$, подставляя это значение в уравнение (2), находим оба отношения скорости и времени, равные $1 : 50^{0.5}$.

Экспериментальная установка состоит из четырех модулей: вентиляционного канала, контрольных клапанов, вентилятора и системы мониторинга. Вентиляционный канал изготовлен из металлической спиральной трубы диаметром 10 см и длиной 2 м (рис. 4). Слой двухсторонней клейкой ленты толщиной 3 мм прикреплен к внутренней стенке трубы с интервалом 2.5 см. В канале есть несколько отверстий для монтажа датчиков. Отверстие 2 предназначено для датчика поступающего газа, 3 — для датчика скорости вентиляции, 4 — для заполнения газом.

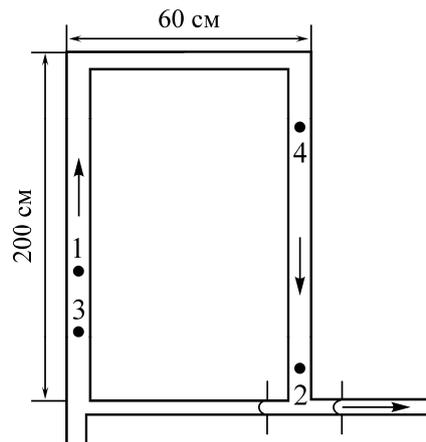


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

На установке предусмотрены два контрольных клапана: левый — для имитации поломки регулятора L , правый — для регулирования скорости общего воздушного потока. Источник вентиляции — небольшой вентилятор, имитирующий вытяжную вентиляцию с возможностью регулирования его работы.

Система мониторинга: в целях безопасности использованы газы N_2 и He вместо метана в соотношении $N_2 : He = 1 : 1$. Отсюда плотность смеси при стандартных условиях 0.7143 г/л, что очень близко к плотности CH_4 при идентичных условиях. Поскольку плотность газа влияет только на давление газовой вентиляции, смесь этих газов может производить эффекты, подобные эффектам с метаном.

Для экспериментальной смеси газов желательно использовать газовый датчик с коротким интервалом измерения. В экспериментах использован датчик кислорода MOX-20 (British Company City) с интервалом измерения менее 800 мс. Для мониторинга более низкой скорости вентиляции — FMA900A анемометр (Omega Co., USA), интервал измерения — 250 мс, максимальная частота отбора проб для сбора данных — 500 кГц/с.

Эксперимент включал несколько стадий:

— закрыть левый контрольный клапан. Отрегулировать правый контрольный клапан, отслеживая показания датчика скорости вентиляции для того, чтобы скорость воздушного потока в вентиляционном канале отвечала требованиям эксперимента;

— открыть левый контрольный клапан, заполнить газом через отверстие 4 до момента, когда концентрация кислорода снизится до 0.6 %;

— прекратить наполнение газом, регистрировать скорость вентиляции и концентрацию кислорода в точках измерения, закрыть левый контрольный клапан спустя 5 с и продолжить контролировать скорость вентиляции и концентрацию кислорода.

Для экспериментального изучения распределения воздушного потока, аналогичного описанию реальной аварии, левый контрольный клапан был закрыт, скорость воздушного потока контролировали с интервалом 0.1 м/с, заданный перепад высот вентиляционного канала c — 1.25 м регулировали наклоном экспериментального оборудования. Экспериментальные результаты показаны на рис. 5.

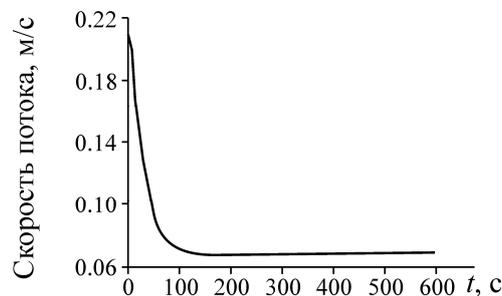


Рис. 5. Профиль скорости воздушного потока

В случае скопления газа скорость воздушного потока экспериментального канала быстро снижается до уровня, который ниже диапазона датчика скорости, поэтому ее можно принять равной нулю, что соответствует данным реальной аварии.

Для исключения застоя воздушного потока под действием давления газовой вентиляции начальную скорость воздушного потока регулировали на уровне 0.5 м/с, в то время как другие экспериментальные условия оставались неизменными. Результаты представлены на рис. 6.

Видно, что при высокой начальной скорости застой воздушного потока не наблюдается. В процессе выпуска газовой смеси скорость воздушного потока снижается, но кратковременно. Концентрация кислорода в отверстии 2 падает до низкого значения, но вскоре возвращается до нормы. Этот результат показывает, что объем газа снижается равномерно, давление газовой вентиляции не может блокировать воздушный поток. На основе результатов данного эксперимента можно сделать вывод, что повышенная начальная скорость воздушного потока позволяет исключить явление застоя.

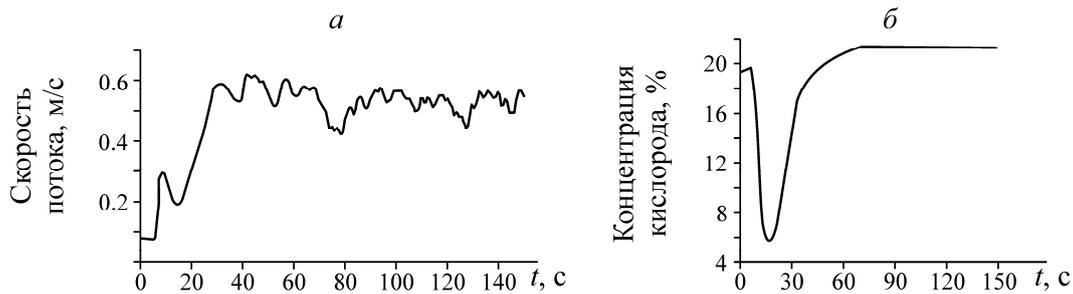


Рис. 6. Профиль скорости экспериментального воздушного потока (а) и профиль экспериментальной концентрации кислорода (б)

КРИТИЧЕСКАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

Для отдельной горной выработки, как показано в уравнении (1), примем давление газовой вентиляции как давление вспомогательного вентилятора при условии, что оно ниже сопротивления вентиляции в вентиляционной выработке и воздушный поток, будучи нереверсивным относительно начального направления воздушного потока, противоположен направлению давления газовой вентиляции. Вентиляционное сопротивление можно представить как RQ^2 , где R — сопротивление штрека в режиме нормальной вентиляции, кг/м^7 ; Q — расход воздуха в режиме нормальной вентиляции, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Следующее требование должно быть выполнено в случае, когда воздушный поток придерживается нормального направления:

$$h_{Mi} = (\bar{\rho}_i - \rho_a)[z_i(0) - z_i(L_i)]g < RQ^2 = \alpha \frac{LU}{S} v^2, \quad (3)$$

здесь U — контур штрека, м; α — коэффициент сопротивления трения, кг/м^3 ; L — протяженность штрека, м; S — площадь поперечного сечения, м^2 ; v — нормальная скорость в вентиляционных выработках, м/с.

На основании уравнения (3) получаем следующее уравнение:

$$\frac{\sin \theta}{v^2} < \frac{\alpha U}{S(\bar{\rho}_i - \rho_a)g}, \quad (4)$$

где $\bar{\rho}_i = \rho_{\text{CH}_4} C + \rho_a (1 - C)$, ρ_{CH_4} — плотность метана, кг/м^3 , C — концентрация метана в вентиляционной выработке, %; $\sin \theta = [z_i(L_i) - z_i(0)]/L$, θ — угол наклона вентиляционной выработки, град. Для вертикальной вентиляционной выработки в угольной шахте при $L = 10$ м, $U = 12$ м, $\alpha = 0.028 \text{ кг/м}^3$, $\rho_a = 1.29 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{CH}_4} = 0.72 \text{ кг/м}^3$, $v = 3$ м/с, $\theta = 30^\circ$, тогда $C > 10\%$, имеет место нарушение воздушного потока в вентиляционной выработке.

На основании уравнения (4) можно сделать вывод, что скопление газа может нарушить устойчивость воздушного потока. Однако при относительно высокой концентрации метана воздушный поток реверсируется. Концентрация метана не должна превышать 10% в вертикальной вентиляционной выработке. Следовательно, давление газовой вентиляции отличается от механизма конвекционного скопления метана. Оба явления индуцируются разной плотностью газа, концентрация метана обычно менее 1% в механизме конвекционного скопления метана, больше внимания уделяется взрывам, вызванным избыточным содержанием газа, а устойчивость вентиляционного воздушного потока не рассматривается.

ВЫВОДЫ

При скоплении метана в вентиляционных выработках формируется давление газовой вентиляции относительно перепада высот, поскольку плотность метана ниже плотности воздуха. Давление газовой вентиляции можно рассматривать как увеличение давления естественной тяги.

В наклонной вентиляционной выработке с высокой концентрацией метана давление газовой вентиляции может вызывать застой воздушного потока или его реверсирование особенно в каналах с относительно малой скоростью потока.

Для исключения влияния давления газовой вентиляции на устойчивость воздушного потока необходимо принять следующие меры: обеспечить надежное управление структурами шахтной вентиляции, повысить расход и скорость воздушного потока в вентиляционных штреках с газовой выделением. Также следует осуществлять мониторинг выделения и вентиляции газовых потоков и систем вентиляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kursunoglu N. and Onder M.** Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, Vol. 48. — P. 101–109.
2. **Wallace K., Prosser B., and Stinnette J. D.** The practice of mine ventilation engineering, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, Vol. 25. — P. 165–169.
3. **Cheng J. and Yang S.** Data mining applications in evaluating mine ventilation system, *Safety Science*, 2012, Vol. 50. — P. 918–922.
4. **Kazakov B. P., Shalimov A. V., and Semin M. A.** Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 86. — P. 288–293.
5. **El-Nagdy K. A.** Stability of multiple fans in mine ventilation networks, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, Vol. 23. — P. 569–571.
6. **Mazarrón F. R., Porrás-Amores C., and Cañas-Guerrero I.** Annual evolution of the natural ventilation in an underground construction: Influence of the access tunnel and the ventilation chimney, *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, Vol. 49. — P. 188–198.
7. **Pathak K.** Numerical simulations of dynamics of a tunnel fire, Lamar University – Beaumont: Ann Arbor, 2004. — P. 119–119.
8. **Li C., Li J., Hu L., and Hou D.** Visualization and simulation model of underground mine fire disaster based on Cellular Automata, *Applied Mathematical Modelling*, 2015, Vol. 39. — P. 4351–4364.
9. **Sasmito A. P., Kurnia J. C., Birgersson E., and Mujumdar A. S.** Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine, *Applied Thermal Engineering*, 2015, Vol. 90. — P. 1144–1150.
10. **Hansen R.** Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines, *Fire Safety Journal*, 2015, Vol. 71. — P. 194–216.
11. **Chang X.** The transient-state simulation of mine ventilation systems, Michigan Technological University, 1987. — 324 p.
12. **Zhu H., Song Z., Hao Y., and Feng S.** Application of simulink simulation for theoretical investigation of nonlinear variation of airflow in ventilation network, *Procedia Engineering*, 2012, Vol. 43. — P. 431–436.
13. **Zapletal P., Hudeček V., and Trofimov V.** Effect of natural pressure drop in mine main ventilation/skutki naturalnego spadku Ciśnienia W głównej sieci wentylacyjnej kopalni, *Archives of Mining Sciences*, 2014, Vol. 59. — P. 501–508.
14. **Zhou X.** Optimal control on underground mine fire, Michigan Technological University: Ann Arbor, 1988 — P. 156–156.
15. **Wang K., Zhou A., and Li S.** Computer simulation of dynamic influence of outburst gas flow on mine ventilation network, *Disaster advances*, 2012, Vol. 6. — P. 31–38.

Поступила в редакцию 15/XI 2016