

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.663.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУШЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ СТВОЛАХ

Б. Ни^{1,2,3}, Б. Пэн^{1,2}, Ц. Го⁴, С. Лью^{1,2}, Ш. Лью^{1,2}, Ц. Шэнь^{1,2}

¹Ведущая государственная лаборатория ресурсов и безопасной добычи угля,
№ D11, Сюэюн, Хайдин, 100083, г. Пекин, Китай

²Ведущая Пекинская лаборатория энергодобычи и новых источников энергии,
№ D11, Сюэюн, Хайдин, 100083, г. Пекин, Китай

³Синьцзянский инженерный институт, E-mail: bshnie@cumtb.edu.cn,
№ 1350, Айдинхэ, Тоутунхэ, 830023, г. Урумчи, Китай

⁴Китайская корпорация тяжелого судостроения,
№ 714 Институт, № A2, Шуанцэнбу, Чаоян, 100083, г. Пекин, Китай

Нарушение воздушного потока в шахтных стволах и связанных с ними примыкающих выработок, вызванное локальной естественной тягой, является сложным термодинамическим явлением. Причины нарушения воздушного потока анализируются теоретически и проверяются с помощью моделирования и исследования in-situ. Результаты исследований показывают, что локальная естественная тяга формируется, когда в подземной шахте с вытяжной вентиляцией образуется разница температур или разность плотности воздуха в стволах. При значительном изменении локальной естественной тяги возникают нарушения воздушного потока в шахтных стволах или примыкающих выработках. Результаты исследований имеют важное значение для повышения устойчивости вентиляционной системы и улучшения условий труда в шахтах.

Шахтный ствол, воздухоподающий, нарушение воздушного потока, локальная естественная тяга, моделирование, исследование in-situ

DOI: 10.15372/FTPRPI20180310

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная система вентиляции — это гарантия безопасности при добыче полезных ископаемых в подземной шахте, которая обеспечивает достаточное поступление свежего воздуха, удаление опасных газов и пыли и поддержание соответствующего микроклимата. Тем не менее нестабильность воздушного потока проявляется в диагональных и других вентиляционных выработках, таких как воздухоподающие шахтные стволы, по следующим причинам: срыв потока

Исследование финансировалось Ведущей государственной программой развития науки Китая (грант № 2016YFC 060708-1) Национального фонда естественных наук Китая (№ 51374216) и Фондами фундаментальных исследований для центральных университетов (грант № 2009KZ03).

с лопаток вентилятора, не отвечающая требованиям вентиляционная сеть, естественная тяга и разного рода аварии [1–7]. Естественная тяга — это разность давлений, вызванная тепловой депрессией из-за разницы температур [8–11]. Ежегодно, сезонно и ежедневно естественная тяга изменяется по величине и направлению [12–18]. Решающими факторами являются средняя разность плотности воздушного столба и разность высоты между воздухоподающим и воздуховыдающим шахтными стволами [19–23]. Исследования показывают, что локальная естественная тяга образуется между воздухоподающими стволами, если в шахте имеется несколько стволов. Локальная естественная тяга зависит от разности высоты над уровнем моря и средней разности плотности воздушной среды между воздухопадающими стволами. Ее направление может изменяться с отрицательного на положительное значение [24] и влиять на распределение воздуха воздухоподающих стволов и направление воздушного потока [25, 26]. Поэтому локальная естественная тяга может вызвать нарушение воздушного потока и даже привести к несчастным случаям на производстве в зоне воздухоподающего ствола [27].

Нарушения воздушного потока воздухоподающего ствола зафиксированы на 34 шахтах Китая в период 1973–2013 гг. [28] (табл. 1). Происходят они главным образом поздней осенью, зимой и ранней весной, чаще всего на крупных шахтах с центральной системой вентиляции. Сопутствующие явления — плотный туман в устье ствола при движении воздуха, большие наледения на стенках ствола на стадии уменьшения скорости воздуха, накопление опасного газа или пыли на рудном транспорте или в зоне хранения околоствольного двора. Чтобы выявить причины нарушения воздушного потока в подающих стволах, были установлены некоторые принципы нарушения [29–32].

ТАБЛИЦА 1. Исследование нарушения воздушного потока воздухоподающих шахтных стволов в Китае

Дата	Название угольных шахт и рудников	Производительность, млн т / год	Тип ствола	Глубина, м	Схема вентиляции
12.2013	Чжэнли, провинция Шаньси	1.50	Главный ствол	568	Центральная смежная
04.2013	Чжэнчжун, провинция Шаньси	0.90	Главный уклон вспомогательный ствол	304 355	Центральная смежная
01.2013	Селян, провинция Внутренняя Монголия	5.00	Подающий ствол	180	Центральная смежная
12.2011	Шунхэ, провинция Хэнань	0.60	Главный ствол	740	Центральная смежная
11.2011	Руидонг, провинция Шаньси	1.20	Пешеходный уклон	950	Центральная смежная
10.2011	Циньпиньган, провинция Шаньси	1.20	Наклонный ствол	352	Центральная пограничная
02.2010	Кузидонг, провинция Аньхой	5.00	Главный ствол	995	Центральная смежная
12.2010	Нантун, провинция Шаньдун	3.00	Главный ствол скипо-клеть	410 432	Центральная диагональная
12.2009	Вэйшан, провинция Шаньси	0.90	Главный уклон вспомогательный ствол	209 252	Центральная смежная
01.2007	Лянбэй, провинция Хэнань	0.90	Главный ствол	679	Центральная пограничная
02.2006	Чжанбэй, провинция Аньхой	3.00	Главный ствол	518	Центральная смежная
12.2005	Цинцю, провинция Хэнань	1.80	Старый ствол № 4 Новый ствол № 4	141 155	Комбинированная

Продолжение табл. 1

11.2005	В провинции Хэнань	0.30	Главный уклон	332	Центральная смежная
10.2005	Синцяо, провинция Аньхой	1.50	Вспомогательный ствол Вспомогательный шахтный ствол	333 303	Двусторонняя диагональная
01.2005	Лончжэн, провинция Цзянсу	1.05	Новый главный ствол Новый вспомогательный ствол	1062 1062	Центральная смежная
11.2004	Баоан, провинция Шандун	0.21	Вспомогательный наклон	217	Центральная пограничная
11.2003	Уокси, провинция Хунань	0.30	Главный ствол № 1 Пешеходный уклон	355 250	Центральная-диагональная
12.2002	Линси, провинция Хэбэй	2.30	Стол № 5 Стол № 6	496 616	Двусторонняя диагональная
12.2001	Цинхуагон, провинция Шаньси	4.50	Уклон № 311 Стол № 305	227 220	Комбинированная
11.2001	Цинбао, провинция Аньхой	0.03	Стол № 3	420	Комбинированная
11.2001	Шангао, провинция Шаньдун	0.09	Вспомогательный ствол	108	Центральная пограничная
11.2001	Пэйчен, провинция Цзянсу	0.30	Вспомогательный ствол	429	Центральная диагональная
11.2000	Ванцун, провинция Шаньси	1.50	Главный уклон Вспомогательный ствол	284 339	Двусторонняя диагональная
02.1999	Чеджи, провинция Хэнань	1.80	Вспомогательный ствол	586	Двусторонняя диагональная
01.1998	Женчжэнди, провинция Шаньси	1.50	Вспомогательный наклон Вспомогательный ствол	255 353	Двусторонняя диагональная
12.1997	Медный рудник Шенбу, провинция Ганьсу	1.00	Главный ствол Вспомогательный ствол	311	Двусторонняя диагональная
06.1997	Чжуншань, провинция Сычуань	0.03	Средняя штольня	—	Двусторонняя диагональная
02.1994	Люцяо, провинция Аньхой	0.60	Главный ствол	432	Центральная-пограничная
11.1993	Цишан, провинция Цзянсу	1.20	Южный вспомогательный ствол Северный вспомогательный ствол	450 450	Комбинированная
12.1991	Медный рудник Бицигоу, провинция Шаньси	1.00	Главный ствол Вспомогательный ствол	310	Двусторонняя диагональная
12.1991	Малан, провинция Шаньси	4.00	Северный ствол № 2	315	Комбинированная
11.1986	Гуаньшан, провинция Ляонин	0.81	Главный ствол	1000	Комбинированная
12.1983	Цзяян, провинция Сычуань	1.20	Наклонный конвейерный ствол	215	Комбинированная
12.1973	Чжонлианшан, провинция Сычуань	0.60	Центральная штольня	—	Двусторонняя диагональная

В настоящей работе основное внимание уделено характеристикам нарушения воздушного потока в воздухоподающих стволах в разных температурных условиях. Приведены теоретический анализ и моделирование, представлены соотношения между разностью температур и локальной естественной тягой, зависимость между локальной естественной тягой и депрессией шахтных стволов и закономерностями изменения состояния воздушного потока воздуха на воздухоподающих стволах.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА

Понятие локальной естественной тяги. В подземной шахте с несколькими стволами одинаковой глубины естественная тяга представляет собой среднюю разницу плотности воздуха между стволами, которая связана с температурой, давлением воздуха и относительной влажностью. Определим понятия общей и локальной естественной тяги в вентиляционной системе: первая возникает между воздухоподающим и воздуховыдающим стволом, вторая появляется среди шахтных стволов. Локальную естественную тягу можно рассматривать как давление теплого и холодного потока воздуха. Давление теплого потока — это результат повышения температуры воздушного потока, а давление холодного — уменьшение температуры воздушного потока.

Как показано на рис. 1, главный ствол и вспомогательный ствол являются воздухоподающими. В холодное время года средняя плотность воздуха в воздухоподающих стволах больше, чем в воздуховыдающих из-за более низкой атмосферной температуры. Общая естественная тяга возникает между воздухоподающими и воздуховыдающими стволами и имеет то же направление, что и вентилятор, что способствует увеличению количества воздуха.

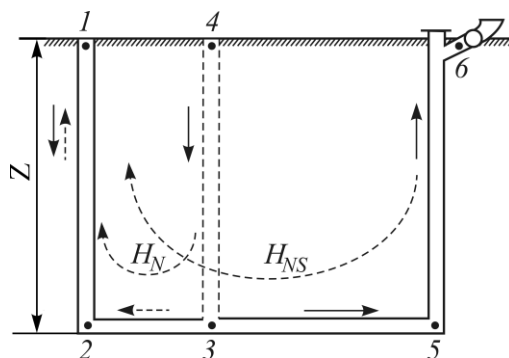


Рис. 1. Нарушение воздушного потока в воздухоподающих стволах, вызванное естественной тягой

Естественную тягу можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} H_{N13} = (\rho_{m12} - \rho_{m56})gZ, \\ H_{N23} = (\rho_{m43} - \rho_{m56})gZ, \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho_i = 0.003484 \frac{P_i}{273 + t_i} \left(1 - \frac{0.378 \varphi_i P_{si}}{P_i} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$\rho_m = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Z_{i,i+1}(\rho_i + \rho_{i+1})}{2}, \quad (3)$$

где H_{N13} — естественная тяга между главным и воздуховыдающим стволом, H_{N23} — между вспомогательным и воздуховыдающим стволом; ρ_{m12} , ρ_{m43} и ρ_{m56} — средняя плотность воздуха главного, вспомогательного и воздуховыдающего ствола соответственно; Z — глубина ствола; g — гравитационное ускорение; ρ_i — плотность воздуха; P_i — абсолютное давление, Па; t_i — температура воздуха, °С; φ_i — относительная влажность; P_{si} — парциальное давление насыщенного пара при t_i , Па; i — точка измерения ствола.

Если $\rho_{m56} < \rho_{m12} < \rho_{m43}$, то локальная естественная тяга H_N между главным и вспомогательным стволом может быть записана уравнением

$$H_N = (\rho_{m43} - \rho_{m12})gZ. \quad (4)$$

Если величина H_N положительная, то ее направление совпадает с движением часовой стрелки, если $\rho_{m56} < \rho_{m43} < \rho_{m12}$, то H_N — отрицательная.

По уравнениям (1) и (4) можно вывести соотношение для локальной естественной тяги:

$$H_N = H_{N23} - H_{N13}. \quad (5)$$

Принцип нарушения воздушного потока. Согласно схеме 1–2–3–4–1 на рис. 1, локальная естественная тяга и депрессия основного и вспомогательного стволов положительные и направлена естественная тяга по часовой стрелке; в противном случае они отрицательны.

1. Нормальный воздушный поток в подающих стволах. Если в воздухоподающих стволах отсутствует тепловая депрессия, поток воздуха нормальный, а локальная естественная тяга не существует в цепи 1–2–3–4–1, то расход воздуха в главном и вспомогательном стволах распределяется в соответствии с их депрессиями. Связь между h_{13} , h_{34} и H_N может быть представлена с помощью метода описания оси (рис. 2а), где h_{13} и h_{34} — депрессии ветвей 1–3 и 3–4 соответственно.

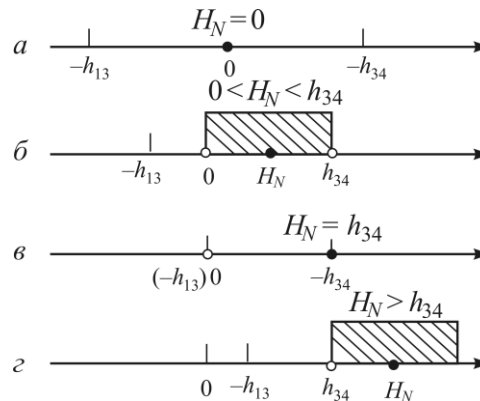


Рис. 2. Связь h_{13} , h_{34} и H_N с методом описания осей при различном состоянии воздушного потока в главном стволе

2. Нарушение воздушного потока в главном стволе. Если в главном стволе существует тепловая депрессия, то она приводит к уменьшению плотности воздуха. В результате возникает локальная естественная тяга, которая препятствует поступлению забора воздуха.

Когда возникает естественная тяга и увеличивается в цепи 1–2–3–4–1, то в соответствии с законом равновесия давления воздуха могут быть получены выражения трех видов состояния воздушного потока в главном стволе:

$$\begin{aligned} h_{34} - h_{13} &= R_{34}Q_{34}^2 - R_{13}Q_{13}^2 = H_N \text{ — нормальное направление воздушного потока} \\ &\text{и уменьшение количества воздуха,} \\ h_{34} &= R_{34}Q_{34}^2 = H_N \text{ — застой воздушного потока,} \\ h_{34} + h_{13} &= R_{34}Q_{34}^2 + R_{13}Q_{13}^2 = H_N \text{ — изменение направления воздушного потока} \\ &\text{и количества воздуха} \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (6) связь между H_N , h_{13} и h_{34} может быть представлена осью (рис. 2б, г); H_N является алгебраической суммой h_{13} и h_{34} , а отношение между H_N и h_{34} определяет состояние воздушного потока в главном стволе. Когда депрессия H_N положительная, она всегда работает в противоположном направлении от воздушного потока главного ствола. Это эквивалентно добавлению расхода воздуха вытяжного вентилятора на устье главного ствола, что препятствует притоку воздуха главного ствола и способствует притоку воздуха воздухоподающего ствола.

Состояние воздушного потока в воздухоподающих стволах зависит от кумулятивного изменения H_N . Когда H_N увеличивается или уменьшается до определенного значения, она вызывает замедление и изменение потока воздуха в воздухоподающих стволах. Для практики важным элементом предотвращения нарушения воздушного потока в воздухоподающих стволах является уменьшение разности плотности потока воздуха и контроль H_N .

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Критерии подобия и расчетные параметры. Для моделирования нарушения воздушного потока воздухоподающих стволов в шахте характеристики потока реальной сети и экспериментальной модели должны соответствовать механическому подобию, а именно геометрическому, кинематическому и динамическому. Соответствующими шкалами являются линейная шкала δ_l , шкала скорости δ_v , шкала плотности δ_ρ и шкала давления δ_p :

$$\delta_l = \frac{l}{l'}, \quad \delta_v = \frac{v}{v'}, \quad \delta_\rho = \frac{\rho}{\rho'}, \quad \delta_p = \delta_\rho \delta_v^2. \quad (7)$$

Согласно принципам подобия [33–35], если два потока полностью механически подобны, они должны иметь одинаковые числа Фруда (Fr), Эйлера (Eu) и Рейнольдса (Re). Однако при проектировании экспериментальной модели вентиляционной системы трудно добиться полного механического подобия из-за различий между шкалами [35].

Нарушение воздушного потока, вызванное локальной естественной тягой в зоне воздухоподающего ствола, представляет термическое динамическое явление. Поскольку существует много источников тепла, влияющих на температуру воздушного потока в зоне воздухоподающего ствола, а конвекционный теплообмен между стенкой ствола и потоком воздуха является сложным теплофизическим процессом, невозможно смоделировать фактическую воздушную турбулентность реального рудника полностью на экспериментальной модели.

В наших экспериментах основное внимание уделяется нарушению воздушного потока в зоне воздухоподающего ствола, вызванного локальной естественной тягой, и нет необходимости рассматривать сходство теплового явления между экспериментальной моделью и реальной системой. Следует убедиться, что экспериментальная модель и реальный объект имеют аналогичные характеристики потока и распределение аэродинамического сопротивления при условии геометрического подобия, а затем можно установить контролируемый источник тепла в экспериментальной модели для достижения цели исследования.

По результатам теоретического анализа нарушения воздушного потока в воздухоподающих стволах фактическая система вентиляции шахты отнесена к упрощенной схеме с двумя воздухоподающими стволами и одним воздуховыдающим стволом (см. рис. 1). Диаметр главного ствола d_1 составляет 5 м, диаметр вспомогательного ствола d_2 — 7 м, а диаметр воздуховыдающего ствола d_3 — 5 м, глубина Z равна 878 м. Когда воздушный поток нормальный, скорость воздуха главного ствола v_1 колеблется от 1.1 до 1.8 м/с, вспомогательного ствола v_2 — от 2.0 до 2.6 м/с, а воздуховыдающего ствола v_3 — от 5.2 до 6.2 м/с. Депрессия h_m составляет ~980 Па.

При $t = -10^\circ\text{C}$, $\rho = 1.348 \text{ кг/м}^3$ и $\nu = 12.43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, получим, что Re_{main} варьирует от $0.44 \cdot 10^6$ до $0.72 \cdot 10^6$, Re_{aux} — от $1.13 \cdot 10^6$ до $1.46 \cdot 10^6$, Re_{ret} — от $2.09 \cdot 10^6$ до $2.49 \cdot 10^6$. Числа Рейнольдса достаточно высокие, чтобы находиться в области автомодельности [35], поэтому метод моделирования Эйлера может быть принят для разработки экспериментальной модели, где t — температура области породы; ρ — плотность воздуха; ν — кинематическая вязкость, Re_{main} , Re_{aux} и Re_{ret} — числа Рейнольдса потока воздуха в центральном, вспомогательном и воздуховыдающем стволах соответственно.

Ограниченный лабораторным пространством диаметр воздуховыдающего ствола модели d'_3 принят равным 0.07 м. Таким образом, $\delta_l = d_3 / d'_3 = 5 / 0.07 = 71.4$. Далее, согласно δ_l , диаметры главного и воздуховыдающего стволов d'_1 и d'_2 определены как 0.07 и 0.102 м соответственно, высота стволов Z' — как 12.3 м.

В эксперименте температура воздуха составляла 15°C, плотность воздуха ρ' — 1.211 кг/м³. Таким образом, $\delta_\rho = \rho / \rho' = 1.348 / 1.211 = 1.1$.

Когда воздушный поток рассчитывался во время эксперимента, максимальная скорость воздуха модели воздуховыдающего ствола $v'_{3\max}$ составляла 4.8 м/с, при этом $\delta_v = v_{3\max} / v'_{3\max} = 6.2 / 4.8 = 1.3$.

Согласно $\delta_l, \delta_v, \delta_\rho, \delta_p = \delta_\rho \delta_v^2 = 1.1 \cdot 1.3^2 = 1.9$ депрессия модели системы $h'_m = h_m / \delta_p = 980 / 1.9 = 515.8$ Па.

Описание экспериментальной системы. Экспериментальная система состоит из смоделированных штреков, вытяжного вентилятора, системы управления температурой воздушного потока и системы сбора данных (рис. 3). Моделируемые штреки включают в себя: один главный ствол, один вспомогательный ствол, один воздуховыдающий ствол и две нижние выработки. Штрек состоит из пластиковых термостойких и герметичных круглых труб. Для обеспечения минимальных потерь тепла внешняя поверхность штрека обертывается слоем теплоизоляции 10 мм в длину. Кроме того, три шаровых клапана установлены на нижнем конце ствола для регулирования сопротивления.

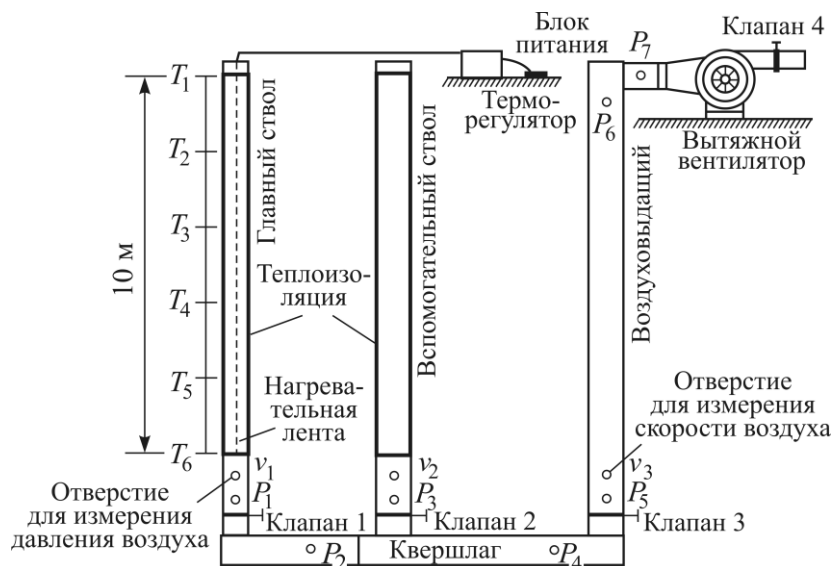


Рис. 3. Экспериментальная система

Центробежный вентилятор используется в качестве вытяжного. Его диапазон давления 590–790 Па. Диапазон количества воздуха составляет 32.5–47.5 м³/мин. Скорость вращения 1450 об/мин. Фактически депрессия экспериментальной системы намного меньше, чем h'_m , поэтому регулирующий клапан соединен с выходом вентилятора для регулирования давления воздуха и количества воздуха вытяжного вентилятора.

Воздушный поток главного ствола нагревается электрической нагревательной лентой, состоящей из проволоки никель-хромового сплава и изоляционных материалов. Нагревательная лента питается от источника напряжением 220 В, а ее температура регулируется multifunctional терморегулятором. Длина нагревательной ленты 10 м. Рабочая температура колеблется от 0 до 150°C. Нагревательная лента и терморегулятор показаны на рис. 4.

Воздушный поток вспомогательного ствола охлаждается при входе быстрым хладагентом (рис. 5). Внутренняя часть входной секции покрыта теплоизоляционным хлопком, длина и толщина которого составляют 25 см и 2 мм соответственно. Перед охлаждением воздушного потока термоизоляционный хлопок смачивается небольшим количеством воды, чтобы быстрее замерзнуть, когда охлаждающая жидкость распылится на его поверхности.

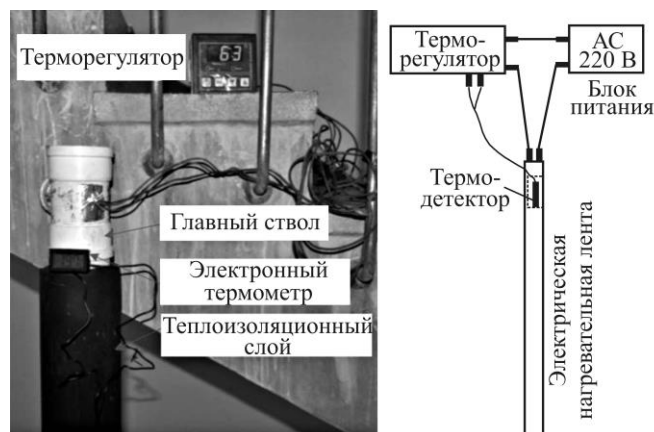


Рис. 4. Метод нагревания воздушного потока главного ствола

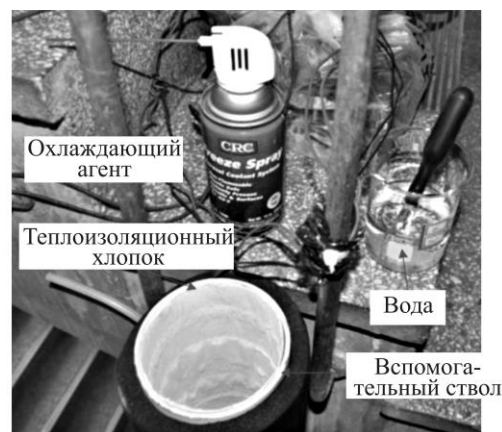


Рис. 5. Метод охлаждения воздушного потока вспомогательного ствола

Система сбора данных. Абсолютное давление измеряется цифровым прецизионным барометром, относительное давление, скорость и относительная влажность воздушного потока — с помощью многопараметрического тестера. Вентиляционное сопротивление измеряется с помощью многопараметрического тестера и трубки Пито, температура воздушного потока — цифровым термометром. Направление воздушного потока подающих стволов оценивается по направлению вращения крыльчатки электронного анемометра.

Ход эксперимента и его результаты. Температура в помещении составляет $17.3 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Когда вентилятор работает стабильно, воздушный поток главного ствола постепенно нагревается от 40°C и увеличивается на 20°C каждые 10 мин. Если воздушный поток замедляется в главном стволе, то воздушный поток вспомогательного ствола охлаждают в течение 5 мин. Нагрев воздушного потока главного ствола прекращается через 20 мин. Этапы эксперимента отражены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Ход эксперимента

Этап	Нагретый ствол	Температура теплоносителя, $^\circ\text{C}$		Охлажденный ствол	Охлаждение	Время, ч : мин
		установленная	фактическая			
I	Главный	0	17.3	Вспомогательный	Нет	16:10
II		40	39 ~ 47		Нет	16:20
III		60	59 ~ 66		Нет	16:30
IV		80	79 ~ 84		Нет	16:40
V		80	79 ~ 84		Нет	16:55
VI		80	79 ~ 84		Да	17:05
VII		80	79 ~ 84		Нет	17:10
VIII		0	17.5 ~ 84		Нет	17:25

Воздушный поток вспомогательного ствола охлаждается хладагентом, когда воздушный поток главного ствола нагревается до установленного состояния. На рис. 6а показано изменение скорости в главном стволе при тепловой депрессии.

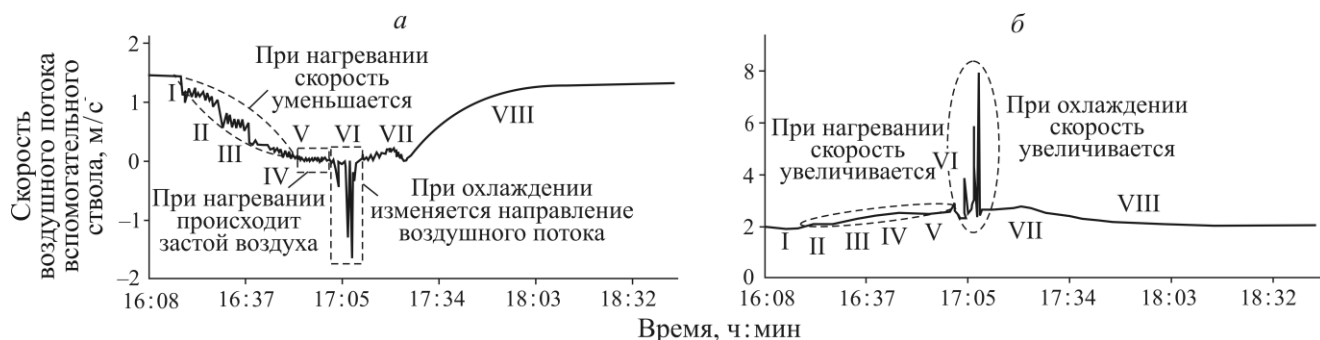


Рис. 6. Скорость воздушного потока в воздухоподающих стволах при взаимодействии нагревающего воздушного потока главного (а) и охлаждающего воздушного потока вспомогательного ствола (б)

На этапе I температура воздушного потока в вентиляционной системе равна внутренней температуре, скорость воздушного потока в главном и вспомогательном стволах составляет 1.43 и 1.95 м/с соответственно. На этапах II–IV с увеличением температуры теплоносителя скорость потока воздуха в главном стволе постепенно уменьшается. На этапе V воздушный поток главного ствола замедляется, когда температура теплоносителя равна 80°C. На этапе VI при охлаждении воздушного потока вспомогательного ствола скорость воздушного потока увеличивается во вспомогательном стволе, а воздушный поток быстро меняет направление в главном стволе. На этапе VII при остановке охлаждения воздушный поток замедляется в главном стволе. На этапе VIII при остановке нагрева скорость воздушного потока восстанавливается до расчетного значения в главном стволе и постепенно уменьшается во вспомогательном. На этапах I–V, когда поток воздуха в главном стволе непрерывно нагревается, естественная тяга теплого потока H_N увеличивается. Перед нагревом воздушного потока главного ствола депрессия входной секции центрального ствола h_{13} и вспомогательного ствола h_{34} составляет 9.7 Па, давление теплового ветра H_N равно нулю. Когда воздушный поток в главном стволе замедляется, а температура теплоносителя составляет 80°C, депрессия вспомогательного ствола h_{34} равна 11.1 Па.

При застое плотность воздуха в точках измерения в главном стволе рассчитывалась по формуле (2) (табл. 3). Значение давления теплого потока H_N между главным и вспомогательным стволами составляет 11.4 Па в соответствии с (4). H_N приблизительно равна h_{34} , что соответствует (6), когда воздушный поток замедляется в главном стволе:

$$H_N = (\rho_{43} - \rho_{12})gZ = (1.207 - 1.102) \cdot 9.8 \cdot 11.1 = 11.4 \text{ Па.}$$

На рис. 7 показана зависимость между давлением теплого потока H_N , депрессией главного и вспомогательного стволов h_{13} и h_{34} . Причина, по которой воздушный поток замедляется в главном стволе (рис. 7а), заключается в том, что давление теплого потока перемещается вдоль положительного направления оси.

На этапе VI, когда поток воздуха главного ствола меняет направление, депрессия главного ствола h_{13} составляет 6.4 Па, а депрессия вспомогательного ствола h_{34} — 13.7 Па. На этом этапе плотность воздуха в точках измерения в главном и вспомогательном стволах рассчитывается согласно (2), как показано в табл. 3 и 4. Значение локальной естественной тяги H_N между главным и вспомогательным стволами составляет 20.3 Па, по формуле (4) H_N больше h_{34} , что соответствует (6):

$$H_N = (\rho_{43} - \rho_{12})gZ = (1.292 - 1.105) \cdot 9.8 \cdot 11.1 = 20.3 \text{ Па.}$$

ТАБЛИЦА 3. Плотность воздуха в главном стволе при замедлении и обратном движении потока

Точка измерения	Расстояние, м	Температура, °С	Абсолютное давление, Па	Плотность воздуха, кг·м ⁻³
Замедление воздушного потока				
0	0	17.2	100 808.7	1.207
T1	0.3	21.2	100 810.2	1.190
T2	2.3	24.3	100 832.2	1.177
T3	4.3	50.9	100 853.3	1.073
T4	6.3	51.2	100 876.2	1.072
T5	8.3	59.1	100 899.2	1.048
T6	10.3	57.2	100 922.2	1.053
V1	11.1	28.3	100 943.0	1.162
Обратное движение потока				
0	0	16.9	100 798.7	1.208
T1	0.3	20.8	100 808.3	1.191
T2	2.3	23.9	100 823.7	1.179
T3	4.3	49.7	100 838.4	1.078
T4	6.3	50.6	100 846.3	1.075
T5	8.3	57.4	100 878.9	1.053
T6	10.3	56.7	100 897.2	1.055
V1	11.1	27.8	100 917.8	1.164

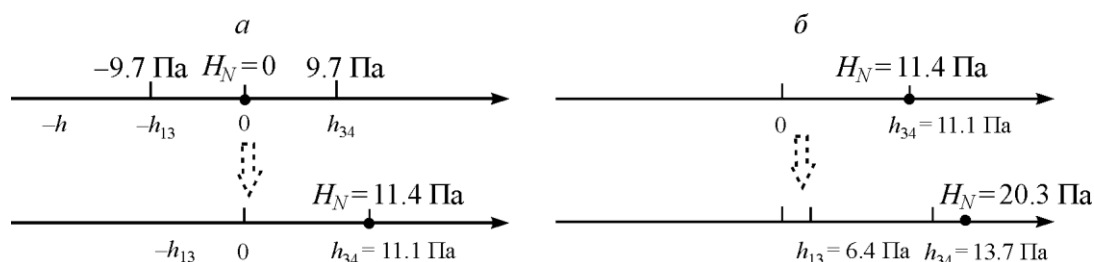


Рис. 7. Зависимость между H_N , h_{13} и h_{34} при замедленном (а) и при обратном движении (б) воздушного потока

ТАБЛИЦА 4. Плотность воздуха вспомогательного ствола при обратном движении потока воздуха в главном стволе

Точка измерения	Расстояние, м	Температура, °С	Абсолютное давление, Па	Плотность воздуха, кг·м ⁻³
0	0	-36.2	100 349.4	1.476
T1	0.3	-34.6	100 362.8	1.467
T2	2.3	-14.4	100 389.4	1.352
T3	4.3	-3.5	100 413.9	1.297
T4	6.3	6.3	100 439.3	1.251
T5	8.3	12.6	100 463.8	1.223
T6	10.3	14.3	100 488.3	1.216
V1	11.1	17.1	100 502.0	1.204

Причина, по которой воздушный поток меняет направление в главном стволе (рис. 7б) состоит в том, что локальная естественная тяга постоянно направлена вдоль положительного направления оси.

ИССЛЕДОВАНИЕ IN-SITU

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, нарушение воздушного потока в воздухоподающем стволе в основном обусловлено локальной естественной тягой. Чтобы убедиться в этом, исследование было проведено в компании Zhengli Coal Co. Ltd из Shanxi Coking Coal Group.

Предмет исследования воздухоподающего ствола. В угольной шахте Чжэнли использовали разработку вертикального ствола и центральной смежной вентиляционной системы. Зона воздухоподающего ствола представлена главным стволом, вспомогательным и прилегающими зонами (рис. 8). Выработки, связанные с главным стволом, включают выработки с загрузочной камерой, конвейером и угольным обогащением. Прилегающие зоны, связанные со вспомогательным стволом, включают южный обход, северный обход и пешеходный туннель. Главный ствол используется для подъема угля, поэтому температура воздушного потока легко увеличивается из-за теплового излучения поверхности, отбитого угля, окружающих пород и электрооборудования. Вспомогательный ствол применяется для транспортировки материалов и рабочих. Его поверхность характеризуется низкой степенью герметичности, а температура воздушного потока сильно зависит от атмосферных условий. Поэтому существует разность температур между воздушным потоком ствола и формами локальной естественной тяги. Когда область выработки находится в области низких температур, нарушение воздушного потока часто происходит в воздухоподающем стволе, в частности в загрузочной камере.

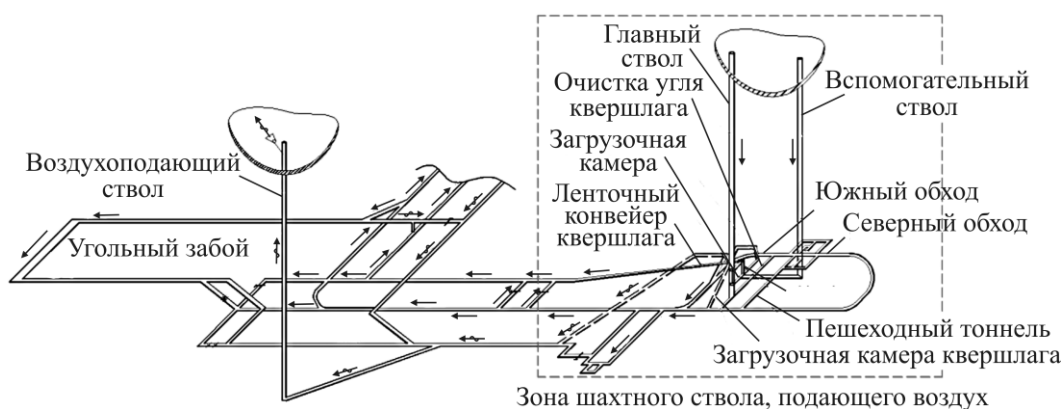


Рис. 8. Воздухоподающий ствол в компании Zhengli Coal Co., Ltd

Результаты исследований и анализ. Скорость воздуха загрузочной камеры и температура измерялись с 12:00 ч 28 апреля до 12:00 ч 29 апреля. На рис. 9 показано изменение скорости воздуха загрузочной камеры при изменении температуры. Скорость воздуха расчетная, когда температура воздуха колеблется от 19.0 до 20.3°C, и постепенно уменьшается, когда температура воздуха снижается до 1.2°C. Скорость воздуха обратного потока доходит до -0.76 м/с, если температура воздуха снижается до 0.6°C и увеличивается до 1.48 м/с, если температура постепенно повышается до 19.7°C.

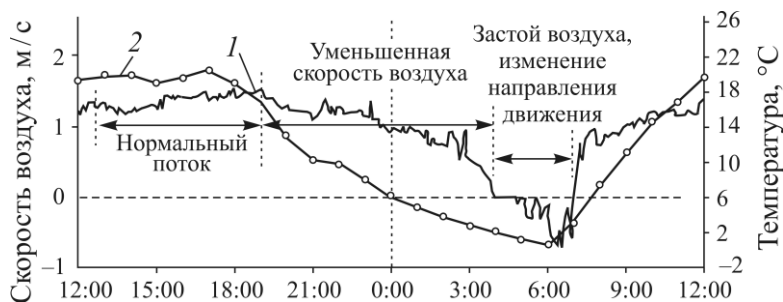


Рис. 9. Скорость потока воздуха загрузочной камеры при различной температуре: 1 — скорость воздуха в загрузочной камере; 2 — температура воздуха

В табл. 5 приведены результаты расчета количества воздуха главного, вспомогательного и воздухоподающего стволов. Количество воздуха воздухоподающего и воздухоподающего стволов изменяется, когда поток воздуха загрузочной камеры меняет направление. В главном стволе количество воздуха уменьшается с 1661 до 252 м³/мин, что означает, что воздушный поток переходит в состояние застоя. Количество воздуха вспомогательного ствола увеличивается в 1.5 раза по сравнению с исходным, а воздухоподающего ствола увеличивается незначительно.

ТАБЛИЦА 5. Результаты измерения количества воздуха в главном, вспомогательном и воздухоподающем стволах, м³/мин

Время, ч : мин	Поток воздуха в загрузочной камере	Ствол		
		главный	вспомогательный	воздухоподающий
15:10 – 15:50	Расчетный	1661	3826	5576
0:00 – 0:40	Количество снижено	1084	4415	5605
5:00 – 5:40	Застой и изменение направления	252	5662	6028
11:00 – 11:40	Расчетный	1565	3917	5594

Согласно теоретическим и экспериментальным результатам, количество воздуха главного ствола уменьшается, если температура воздуха постепенно снижается. Из этого следует, что локальная естественная тяга возникает между главным и вспомогательным стволами и постепенно увеличивается и препятствует поступлению воздуха в главный ствол. Для проверки этого температура, относительная влажность и абсолютное статическое давление испытывались на разных участках воздухоподающих стволов, когда поток воздуха был расчетным и менял направление в загрузочной камере. Плотность воздуха рассчитывалась по уравнению (2).

На рис. 10а показана расчетная плотность воздуха при нормальном потоке в камере, а на рис. 10б — расчетная плотность воздуха при обратном потоке. Сравнивая рис. 10а и б, можно сделать вывод, что параметры воздушного потока в главном и вспомогательном стволе изменялись при изменении потока воздуха. Температура воздуха в главном стволе выше, чем во вспомогательном, а плотность воздуха больше во вспомогательном стволе.

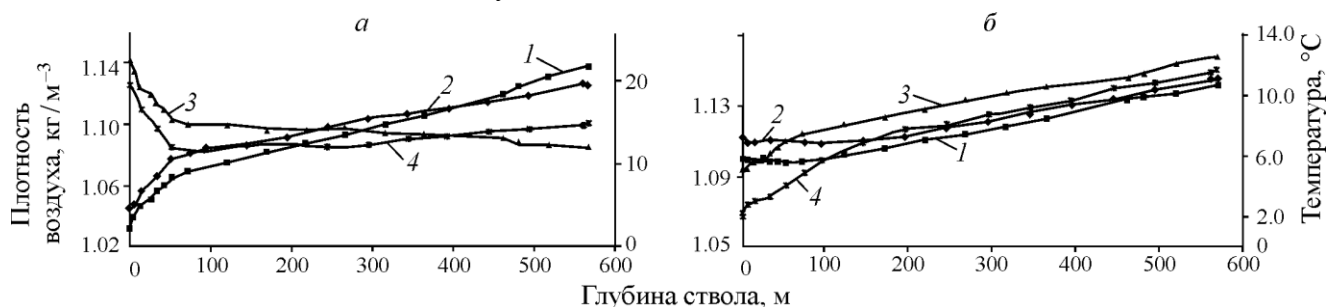


Рис. 10. Параметры потока воздуха воздухоподающего ствола при нормальном (а) и обратном потоке (б) воздуха в загрузочной камере: 1, 2 — плотность воздуха в главном и вспомогательном стволе; 3, 4 — температура воздушного потока в главном и вспомогательном стволе

Уровень слияния потоков воздуха главного и вспомогательного стволов задан как эталонная плоскость, потенциальная энергия ствола E_p в устьях воздухоподающих стволов рассчитана по уравнению

$$E_p = \int_2^1 \rho g dZ = \sum_{i=1}^n Z_i \rho_i g, \quad (8)$$

где Z_i — разность высот i -го участка измерения; ρ — средняя плотность воздуха ствола; ρ_i — плотность воздуха i -го участка измерения; g — гравитационное ускорение.

Локальную естественную тягу вычислим следующим образом:

$$H_N = E_{p2} - E_{p1}, \quad (9)$$

здесь E_{p1} , E_{p2} — потенциальная энергия устья главного ствола и со стороны устья вспомогательного ствола соответственно.

Депрессия между устьем h_1 и основанием главного ствола h_2 ствола находится так:

$$h_i = P_0 - P + E_{pi} - \frac{1}{2} \rho_c v_c^2, \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

где P_0 , P — абсолютное статическое давление устья ствола и слияния потока в околоствольном дворе соответственно; E_{p1} , E_{p2} — потенциальная энергия устья центрального ствола и вспомогательного ствола; ρ_c — плотность воздуха слияния воздушного потока на основании ствола; v_c — скорость воздуха при слиянии потока в околоствольном дворе.

Если воздушный поток нормальный в загрузочной камере, то $E_{p1} = 6116.8$ Па, $E_{p2} = 6129.4$ Па и $H_N = 12.6$ Па в соответствии с уравнениями (8), (9); $P_0 = 87\,778.3$ Па, $P = 93\,825.7$ Па, $\rho_c = 1.1334$ кг/м³, $v_c = 2.2$ м/с. Тогда $h_1 = 66.6$ Па и $h_2 = 79.4$ Па согласно уравнению (10).

Направление H_N такое же, как у потока воздуха вспомогательного ствола, и противоположно воздушному потоку главного ствола, что неблагоприятно влияет на приток воздуха в главный ствол. Однако воздушный поток главного ствола по-прежнему является нормальным, поскольку величина H_N настолько мала, что не влияет на количество воздуха, поступающего в главный ствол.

В замкнутом контуре между главным и вспомогательным стволами положительное направление депрессии совпадает с направлением H_N . На рис. 11 показана зависимость между H_N , h_2 и h_1 , что совпадает с теоретическим результатом.

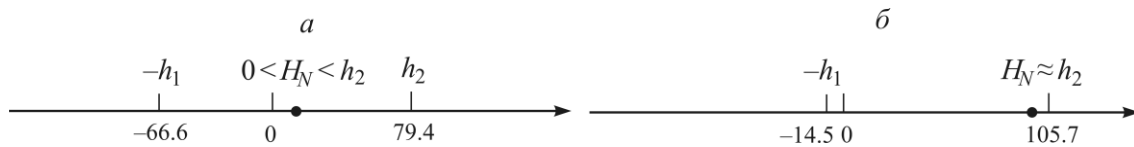


Рис. 11. Взаимосвязь между естественной тягой и депрессией в главном и вспомогательном стволах при нормальном (а) и обратном (б) тепловом потоке

Если поток воздуха изменяет направление в загрузочной камере, то $E_{p1} = 6156.8$ Па, $E_{p2} = 6247.9$ Па и $H_N = 91.1$ Па в соответствии с уравнениями (8) и (9); $P_0 = 87778.3$ Па, $P = 93825.7$ Па, $\rho_c = 1.1451$ кг/м³, $v_c = 2.5$ м/с. Тогда $h_1 = 14.5$ Па и $h_2 = 105.7$ Па согласно уравнениям (10).

При сравнении рис. 11а и б выявляется, что когда поток воздуха загрузочной камеры изменяется от нормального к обратному, локальная естественная тяга направлена вдоль оси и изменяет депрессии главного и вспомогательного стволов. Когда локальная естественная тяга постепенно возрастает, она противодействует давлению воздуха, создаваемого вытяжным вентилятором. Это приводит к уменьшению количества воздуха, поступающего в главный ствол, что приводит к замедлению и изменению потока воздуха в загрузочной камере.

Различные тепловые условия между главным и вспомогательным стволами являются основной причиной, по которой происходит изменение направления воздушного потока в воздухоподающем стволе. Теплообмен между тепловой средой и воздушным потоком в главном стволе интенсивнее, чем во вспомогательном. Следовательно, когда температура окружающей среды снижается, скорость изменения температуры воздушного потока в главном стволе меньше, чем во вспомогательном, потому что разность плотности между двумя воздушными

столбами становится больше. Поскольку локальная естественная тяга формируется в контуре вентиляции и постепенно увеличивается, это приводит к изменению направления потока в прилегающих выработках главного ствола. Если локальная естественная тяга возрастает еще больше, в главном стволе происходит изменение направления потока воздуха.

ВЫВОДЫ

На основании теоретического анализа нарушения воздушного потока, вызванного естественной тягой, приводятся причины такого нарушения в воздухоподающем стволе, а также метод описания осей, объясняющий, как локальная естественная тяга приводит к нарушению воздушного потока.

Локальная естественная тяга между воздухоподающими стволами может быть представлена как давление теплового и холодного потока. Увеличение температуры воздушного потока главного ствола или уменьшение температуры воздушного потока вспомогательного ствола могут генерировать локальную естественную тягу, что способствует снижению расхода воздуха во вспомогательном стволе и препятствует притоку воздуха в главный ствол. Увеличение локальной естественной тяги вызвано непрерывным воздействием давления теплового и холодного потоков в главном и вспомогательном стволах.

Количество воздуха в воздухоподающем стволе меняется из-за взаимодействия давления теплового и холодного потока. Она зависит от тепловой депрессии среды стволов и увеличивает разность температур потока воздуха между стволами. Замедление и изменение направления воздушного потока появляется тогда, когда естественная тяга постепенно увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Branny M., Karch M., Wodziak W., et al.** An experimental validation of a turbulence model for air flow in a mining chamber, XXI fluid mechanics conference, AGH-UST, Krakow, Poland, 2014.
2. **Chen C., Wang H. Y., and Cui X. L.** Mine ventilation system disorder induced by coal and gas outburst, *BioTechnology: An Indian J.*, 2014, Vol. 10, No. 10. — P. 4547–4555.
3. **Cheng G. Y., Qi M. F., Zhang J. G., et al.** Analysis of the stability of the ventilation system in baishan, *Procedia Eng.*, 2012, Vol. 45. — P. 311–316.
4. **Cui C., Xie X. P., Luo W. G., et al.** Analysis of stability of mine airflow, *Int. Conf. Machinery, Electronics and Control Simulation*, Weihai, Shandong Province, China, 2014.
5. **Jia T. G.** Stability of mine ventilation system based on multiple regression analysis, *Int. J. Min. Sci. Techno.*, 2009, Vol. 19, No. 4. — P. 463–466.
6. **Torno S., Torano J., and Velasco J.** Study of ventilation reversion of airflow in mining roadways and tunnels by CFD and experimental methods, *Int. conf. advances in fluid mechanics*, Algarve, Portugal, 2010.
7. **Zhou S. N.** Some basic characteristics of mine ventilation networks, *Int. J. Min. Eng.*, 1984, Vol. 2, No. 3. — P. 261–267.
8. **Hartman H. L., Mutmansky J. M., Ramani R. V., et al.** *Mine ventilation and air conditioning*, New York: John Wiley & Sons, 2012.
9. **Kuang X. X., Jiao J. J., and Li H. L.** Review on airflow in unsaturated zones induced by natural forcings. *Water Resour. Res.*, 2013, Vol. 49, No. 10. — P. 6137–6165.
10. **Sanford R. L.** *Natural ventilation, in mine ventilation and air conditioning*, New York, John Wiley, 1982.
11. **Wala A. M., Stoltz J. R., Thompson E., et al.** Natural ventilation pressure in a deep salt mine — a case study, *Min. Eng.*, 2002, Vol. 54, No. 3. — P. 37–42.
12. **Du C. F., Wang Z., and Liu L. M.** Numerical simulation on natural wind pressure of metal mine, *Int. conf. electric technology and civil engineering*, Lushan, China, 2011.
13. **Hiramatsu Y. and Amano K.** Calculation of the rate of flow, temperature and humidity of air currents in a mine, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 1972, Vol. 9, No. 6. — P. 713–727.

14. **Kawabe K. and Chida K.** Natural ventilation properties and thermal environments of a closed underground mine: Part 1: Measurements and theoretical considerations of nature ventilation properties. Shigen-to-Sozai, 2016, Vol. 132, No. 1. — P. 1–6.
15. **Kazakov B. P., Shalimov A. V., and Semin M. A.** Stability of natural ventilation mode after main fan stop Page, Int. J. Heat Mass Tran., 2015, Vol. 86. — P. 288–293.
16. **Lyal'kina G. B. and Nikolaev A. V.** Natural draft and its direction in a mine at the preset confidence coefficient, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 2. — P. 342–346.
17. **McElroy G. E.** Natural ventilation of michigan copper mines, Washinton: Government Printing Office of United States, 1932.
18. **Zapletal P., Hudecek V., and Trofimov V.** Effect of natural pressure drop in mine main ventilation, Arch. Min. Sci., 2014, Vol. 59, No. 2. — P. 501–508.
19. **Kingery D. S.** Introduction to mine ventilating principles and practices, US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1960.
20. **McPherson M. J.** Subsurface ventilation and environmental engineering: Springer Science & Business Media, 2012.
21. **Reznikov M. and Kachalina L.** Consideration of the natural draft when ventilating underground workings in mountainous areas, Power TechNo. Eng., 1988, Vol. 22, No. 8. — P. 476–480.
22. **Roszczyński W.** Natural ventilation pressure of mines, Przegląd Gorniczy, 1979, Vol. 35, No. 4. — P. 153–158.
23. **Zhou G., Cheng W. M., Nie W., et al.** Prediction and study of air thermal parameters in unexploited mine regions based on temperature prediction model in whole ventilation network, Procedia Eng., 2011, Vol. 26. — P. 751–758.
24. **Alymenko N. I. and Nikolaev A. V.** Influence of mutual alignment of mine shaft on thermal drop of ventilation pressure between the shaft, J. Min. Sci., 2011, Vol. 47, No. 5. — P. 636–642.
25. **Dalgic A. and Karakus A.** A computerised study on the natural ventilation characteristics of the Guleman Kef chromium mine. T. I. Min. Metall. A, 2004, Vol. 113, No. 3. — P. 153–162.
26. **Vasserman A., Alekhichev S., and Krotov K.** Calculation of the distribution of air in a ventilation network under the effect of a complex natural draft, J. Min. Sci., 1965, Vol. 1, No. 3. — P. 268–271.
27. **Jin Z. X., Zhao J., and Kang F. J.** Research into reversion of airflow with multi-ventilation *створ* during mine accidents, Int. symp. safety science and technology, Jiaozuo, Henan, China, 2007.
28. **Guo J. H.** Study on mechanism and control method of the flow disorder in intake shaft zone of mine, Ph. D. Thesis, China University of Mining & Technology (Beijing), 2016. (In Chinese)
29. **Guo H. W.** Reasons and countermeasures on airflow reversal in main shaft under non-fire condition, Safe. Coal Mines, 2010, Vol. 41, No. 11. — P. 92–95. (In Chinese)
30. **Ma L., Yan J. Z., and Li B.** Reasons and preventive measures of the airflow disorder in main shaft of Qinggangping Coal Mine, Safe. Coal Mines, 2012, Vol. 43, No. 11. — P. 171–174. (In Chinese)
31. **Nie B. S., Guo J. H., Zhao B., et al.** Advanced control method and theoretical analysis on reversed airflow of mine main shaft in winter, Coal Sci. TechNo., 2016, Vol. 44, No. 4. — P. 68–72. (In Chinese)
32. **Zhi X. Y., Lai C. M., and Liu J. H.** Prevention research of wellhead air atomization in cold season for wuzhuang iron mine, Min. Res. Dev., 2015, Vol. 35, No. 9. — P. 49–52. (In Chinese)
33. **Murphy G.** Similitude in engineering, New York, Ronald Press, Co., 1950.
34. **Parker D. C. D.** Flow visualization and model experiments in mine ventilation, M. Eng. thesis, McGill University, 1970.
35. **Zhang Y. Y.** Fluid dynamics, Second ed, Beijing: Higher Education Press, 1999. — P. 213–223. (In Chinese)

Поступила в редакцию 15/XI 2017