

УДК 622.45-047.58

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКА ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ВОЗДУШНОЙ ЗАВЕСЫ В ВОЗДУХОПОДАЮЩЕМ И ВЕНТИЛЯЦИОННОМ СТВОЛАХ

А.В. Николаев, Н.И. Алыменко¹, А.А. Каменских¹, Ш.К. Фет², В.А. Николаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

¹Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

²Высшая инженерная школа (Высшая школа технических наук) им. Георга Агриколы (44787, Германия, г. Бохум, Хернер Штрабе, 45)

RESULTS OF MODELLING OF MINE VENTILATION WITH AIR CURTAIN INSTALLED INTO DOWNCAST AND UPCAST SHAFTS

Aleksandr V. Nikolaev, Nikolay I. Alymenko¹, Anton A. Kamenskikh¹, Shtefan K. Fet², Viktor A. Nikolaev

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

¹Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science Perm

Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78 Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

²TH Georg Agricola University of Applied Sciences (45 Kherner Shttrabe st., Bochum, 44787, Federal Republic of Germany)

Получена / Received: 07.06.2017. Принята / Accepted: 19.07.2017. Опубликована / Published: 15.09.2017

Ключевые слова:

воздушная завеса, главная вентиляторная установка, воздухоподающий ствол, вентиляционный ствол, внешние утечки воздуха, шахтная калориферная установка.

В существующих шахтных калориферных установках (ШКУ), предназначенных для нагрева воздуха, подаваемого в воздухоподающие стволы в холодное время года, используется калориферный канал. Часть воздуха из ШКУ подается по калориферному каналу, а часть подсасывается через надшахтное здание за счет общешахтной депрессии, создаваемой шахтной главной вентиляторной установкой (ГВУ). При этом возникает проблема смешения этих двух потоков воздуха, вследствие чего нарушается тепловой режим в стволах, что может привести к нарушению правил безопасности, в частности к нарушению герметизации межтубинговых уплотнений. Также на подземных горнодобывающих предприятиях особо остро стоит вопрос энергосбережения при проветривании. Одной из причин снижения энергоэффективности процесса подачи воздуха в рудник является наличие внешних утечек, возникающих при проветривании по всасывающему способу.

В статье приведено предлагаемое решение обеих задач посредством применения воздушной завесы. При осуществлении воздухоподготовки в холодное время года предлагается воздушную завесу размещать в воздухоподающем стволе выше места сопряжения калориферного канала со стволом для препятствия инфильтрации (подсоса) воздуха через надшахтное здание. Воздушную завесу в вентиляционном стволе в настоящей статье предлагается использовать для снижения внешних утечек воздуха с целью повышения энергоэффективности работы ГВУ. В ходе математического моделирования процесса проветривания и подготовки воздуха (в программном пакете SolidWorks Flow Simulation) установлено, что применение воздушной завесы в воздухоподающем стволе позволит повысить эффективность работы ШКУ, а в вентиляционном стволе – снизить затраты электроэнергии на проветривание.

Key words:

air curtain, main ventilation fan, downcast shafts, upcast shafts, outside air leakage, mine air heater.

Existing mine air heaters (MAH) that heat the air supplied into downcast shafts during the cold period are equipped with a heat channel. A part of the air from a MAH goes through a heat channel. Another part is sucked through a pit head by general depression created by a shaft main fan. That raises a problem of mixing of two air streams, which disturbs thermal regime in the shafts and could lead to violation of safety rules, in particular, create a breach of sealing of intertubular seals. Besides, there is a concern of energy saving during ventilation at underground mining enterprises. One of the reasons for energy efficiency reduce during air supply to a mine are external leaks appeared during ventilation by a suck method. The article presents proposed solution for both problems using air curtain. During air preparation in the cold period, it is proposed to place air curtain in an air downcast shafts above the junction of a heat channel and a shaft. That is done in order to prevent air infiltration (sucking) through a pit head. According to the paper air curtain should be used in the ventilation shaft to decrease outside air leakage in order to increase energy efficiency of a main fan performance. It is determined during mathematical modelling (in SolidWorks Flow Simulation software) of ventilation and air preparation that air curtain can increase efficiency of MAH and decrease energy consumption on ventilation.

Николаев Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (моб. тел.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev0811@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Алыменко Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (моб. тел.: +007 912 789 80 86, e-mail: nik.alymenko@yandex.ru).

Каменских Антон Алексеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (моб. тел.: +007 909 731 69 44, e-mail: anton.kamenskikh@mi-perm.ru).

Фет Стефан Карлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии электроприводов и транспортных систем (моб. тел.: +490 234 968 36 42, e-mail: stefan.voeth@thga.de).

Николаев Виктор Александрович – старший преподаватель кафедры горной электромеханики (моб. тел.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev.va.pstu@mail.ru).

Aleksandr V. Nikolaev (Author ID in Scopus: 56988627700) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mine Electromechanics (mob. tel.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev0811@mail.ru). The contact person.

Nikolay I. Alymenko (Author ID in Scopus: 54895153400) – Doctor of Engineering, Professor, Chief Research Fellow at the Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (mob. tel.: +007 912 789 80 86, e-mail: nik.alymenko@yandex.ru).

Anton A. Kamenskikh – PhD in Engineering, Research Fellow at the Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (mob. tel.: +007 909 731 69 44, e-mail: anton.kamenskikh@mi-perm.ru).

Shtefan K. Fet – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Technology of Electric Drives and Transport Systems (mob. tel.: +490 234 968 36 42, e-mail: stefan.voeth@thga.de).

Viktor A. Nikolaev – Senior Lecturer at the Department of Mine Electromechanics (mob. tel.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev.va.pstu@mail.ru).

Введение

Правилами безопасности [1] предписывается в холодное время года подаваемый в шахтные стволы воздух нагревать до температуры не ниже $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом данному значению температуры должен соответствовать весь объем воздуха, поступающего по стволу во всем его сечении. Однако проведенные в работах [2, 3] исследования показали, что данные правила на практике не соблюдаются. Связано это с тем, что в воздухоподающий ствол поступает два потока воздуха: нагретый в шахтной калориферной установке (ШКУ) подаваемый по калориферному каналу и подсасываемый через надшахтное здание за счет общешахтной депрессии. Вследствие этого поступающий из ШКУ воздух нагревают до гораздо большей температуры, чем требуется, что нередко приводит к существенному превышению значения установленной температуры воздуха в стволе. При этом в воздухоподающих стволах присутствуют участки, температура воздуха в которых незначительно превышает значение $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о низкой эффективности существующего способа управления процессом воздухоподготовки и о возможности нарушения температурного режима в стволе.

Повышение температуры подаваемого в рудник воздуха приводит к увеличению затрат энергоресурсов, расходуемых на работу ШКУ, т.е. к нерациональному их использованию [4, 5].

Ввиду того, что, согласно работе [6], от 30 до 50 % всей затрачиваемой подземным горнодобывающим предприятием электроэнергии расходуется на проветривание, еще одной значимой задачей для производства является разработка способов повышения энергоэффективности работы главной вентиляторной установки (ГВУ).

Описанная выше ситуация, помимо перерасхода энергоресурсов при работе ШКУ и ухудшения условий безопасности производства, вызывает сопутствующую проблему – возникновение между шахтными стволами отрицательной общерудничной естественной тяги [7–14], т.е. когда закачиваемый в воздухоподающие стволы теплый воздух стремится подняться вверх, а охлажденный в руднике – опуститься вниз. Данная проблема актуальна для неглубоких (до 500 м) подземных горнодобывающих предприятий.

Кроме этого существует характерная для всасывающего способа проветривания проблема –

возникновение внешних утечек воздуха [15], вызванная следующей причиной. Воздух в рудник подается по воздухоподающим стволам 1 за счет разряжения, создаваемого ГВУ 2, расположенной на вентиляционном стволе 3 (рис. 1). Кроме воздуха, засасываемого в рудник, при подобной схеме проветривания в канал ГВУ 4 также засасывается наружный воздух через устье вентиляционного ствола 5, который, смешиваясь с общим потоком, снова выбрасывается в атмосферу. Следовательно, помимо полезной работы (закачки свежего воздуха), ГВУ совершает бесполезную работу, обусловленную подсосом внешнего воздуха (внешние утечки).

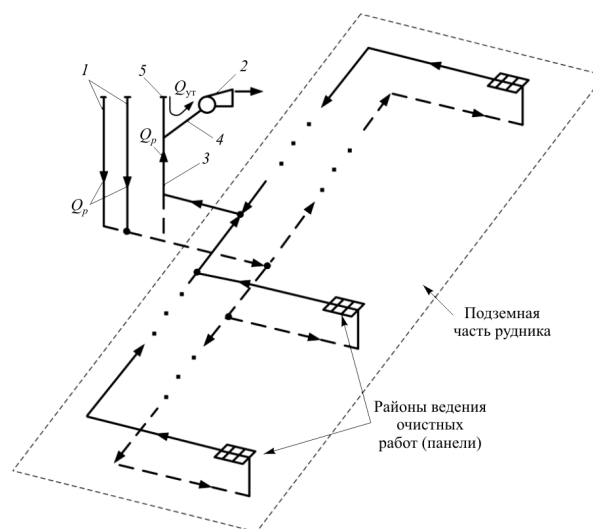


Рис. 1. Упрощенная схема проветривания рудника, работающая по всасывающему способу

Величина утечек (на примере калийных рудников), согласно работе [16], колеблется от 9 до 51 %, т.е. существуют рудники, где КПД работы ГВУ составляет всего 49 %. В связи с этим уменьшение внешних утечек является одним из основных направлений в комплексе мероприятий по снижению затрат горнодобывающих предприятий на проветривание подземного горнодобывающего предприятия.

Описание предлагаемого способа проветривания и воздухоподготовки

С целью повышения эффективности воздухоподготовки и снижения затрат электроэнергии, расходуемой на работу ГВУ, в работе [17] предложено в воздухоподающем и вентиляционном стволах устанавливать воздушную завесу (рис. 2). В воздухоподающем стволе воздушная завеса должна обеспечивать снижение инфильтрации (подсоса) наружного холодного воздуха через надшахтное здание.

В этом случае на работу ШКУ потребуются меньшие затраты энергоресурсов и обеспечится нормализация процесса смешивания воздуха в стволе [18, 19]. Воздушная завеса в вентиляционном стволе необходима для снижения внешних утечек воздуха [15].

Эффективность процесса противодействия внешним утечкам (подсосам) воздуха напрямую зависит от выбора месторасположения воздушной завесы в стволе, параметров вентиляторов, из которых она состоит, и их взаимного расположения.

Двухсторонняя завеса ранее считалась малоэффективной, так как в результате ее применения внешние утечки воздуха в вентиляционном стволе снижались незначительно [15]. Причиной низкой эффективности работы воздушной завесы является то, что потоки воздуха из вентиляторов направляются встречно и препятствуют работе друг друга. В этом случае на противодействие внешним утечкам воздуха в воздушной завесе практически не остается энергии.

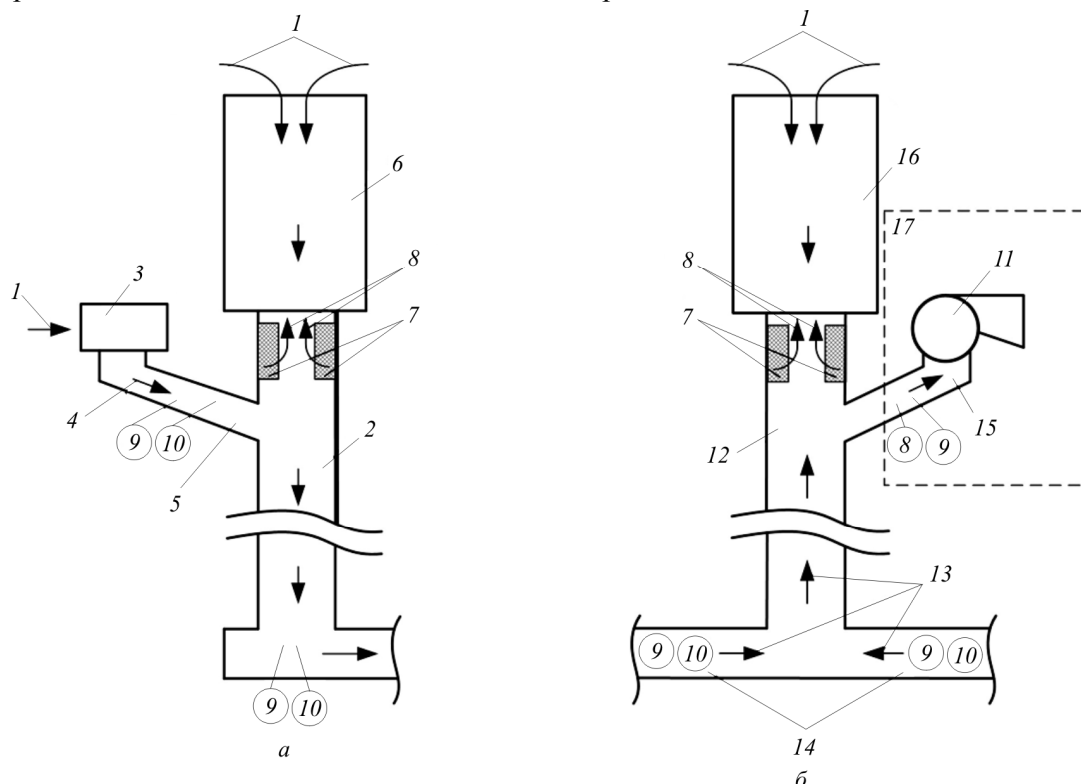


Рис. 2. Проветривание и воздухоподготовка по предлагаемому способу: *а* – воздушная завеса в воздухоподающем стволе; *б* – воздушная завеса в вентиляционном стволе: 1 – наружный воздух (холодный); 2 – воздухоподающий ствол; 3 – ШКУ; 4 – нагретый воздух; 5 – калориферный канал; 6 – надшахтное здание воздухоподающего ствола; 7 – воздушная завеса; 8 – воздух, выдаваемый из воздушной завесы; 9 – датчик расхода воздуха; 10 – датчик температуры, давления (или плотномер); 11 – ГВУ; 12 – вентиляционный ствол; 13 – исходящий по вентиляционному стволу воздух; 14 – главные вентиляционные выработки; 15 – канал ГВУ; 16 – надшахтное здание вентиляционного ствола; 17 – поверхностный комплекс ГВУ

Для решения указанной проблемы в работе [20] предложено потоки встречно направленных вентиляторов разделять при помощи перегородки, расположенной в стволе, а струи воздуха из них направлять под определенным углом α (рис. 3).

Для сокращения внешних утечек воздуха, поступающего через устье ствола, вентиляторы воздушной завесы должны обеспечивать необходимую производительность и давление. Для этого, например, может быть использован шахтный вентилятор местного проветривания

ВМЭ-6, взрывобезопасного исполнения, который применяется на рудниках для проветривания тупиковых горных выработок. По отдельному заказу вентилятор может изготавливаться с глушителем шума.

Известно несколько методов расчета воздушных завес, основанных на различных подходах [21–24], которые за много лет остаются неизменными. Задача указанных методов – определить скорость воздушного потока за завесой и установить зависимость между скоростью и расходом воздуха в ней. Например,

в работе [25] скорость находится путем сложения скоростей струи воздуха и потока, набегающего на завесу, а в работе [24] используется закон сохранения импульса. При этом, как правило, считается, что скорость набегающего на завесу потока воздуха известна [24–27].

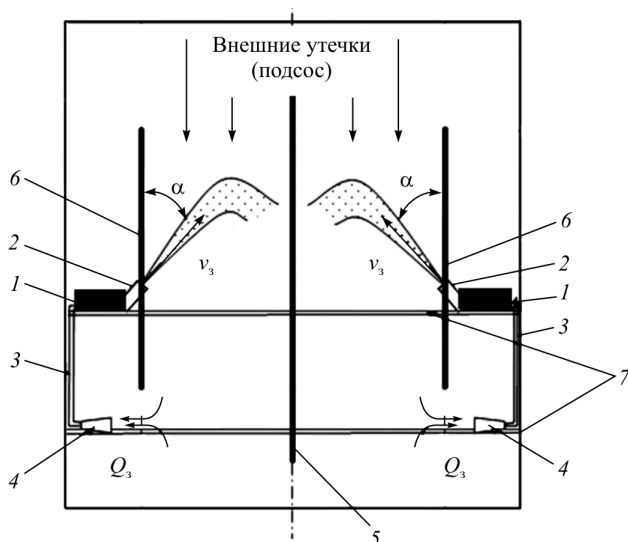


Рис. 3. Принцип действия воздушной завесы в устье ствола: 1 – вентиляторы завесы; 2 – воздухоподводящие короба; 3 – трубопроводы (воздуховоды); 4 – забор воздуха; 5 – продольная перегородка; 6 – продольные перегородки (по периметру сечения в свету); 7 – ярус армировки ствола

Далее выполняется расчет необходимой производительности и давления вентилятора, устанавливаемого на каждой половине воздушной завесы.

Порядок расчета параметров вентиляторов воздушной завесы

Первоначально при определении параметров воздушной завесы необходимо установить следующие исходные данные:

1. Проходное сечение ствола в месте установки завесы (сечение ствола «в свету») $S_{\text{ств}}$, м^2 .

2. Среднюю скорость воздушного потока воздуха без учета действия воздушной завесы v_0 и требуемую с учетом ее действия v_1 , м/с .

3. Длину участка ствола $L_{\text{ств}}$, на котором устанавливаются вентиляторы воздушной завесы, м .

Величина общешахтной депрессии (Па) на участке ствола между сопряжением с каналом ГВУ (калориферным каналом) и дневной поверхностью определяется по формуле

$$h_0 = \frac{aP_{\text{ств}}L_{\text{ств}}v_0}{S_{\text{ств}}^2},$$

где a – коэффициент, определяющий тип ствола (клетевой, скиповой) [5, 28]; $P_{\text{ств}}$ – периметр ствола в месте установки завесы (сечение ствола «в свету»), м .

В зависимости от того, на сколько предполагается снизить внешние утечки (подсос) воздуха, определяется значение, на которое необходимо увеличивать аэродинамическое сопротивление ($\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$) на участке ствола между сопряжением с каналом ГВУ (калориферным каналом) и дневной поверхностью:

$$\Delta R_{\text{ств}} = \frac{R_{\text{ств}}(Q_0^2 - Q_1^2)}{Q_1^2},$$

где $R_{\text{ств}}$ – аэродинамическое сопротивление ствола на участке между сопряжением с каналом ГВУ (калориферным каналом) и дневной поверхностью, $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ [5, 28],

$R_{\text{ств}} = \frac{aP_{\text{ств}}L_{\text{ств}}}{S_{\text{ств}}^3}$; Q_0 – объемный расход внешних

утечек (подсосов) воздуха при отсутствии воздушной завесы, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_0 = v_0S_{\text{ств}}$; Q_1 – объемный расход внешних утечек (подсосов) воздуха при требуемой скорости воздуха (v_1) на данном участке, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_1 = v_1S_{\text{ств}}$.

Требуемая скорость потока воздуха (м/с), исходящего из щели вентилятора воздушной завесы, определяется по формуле

$$v_{\text{в.з}} = \sqrt{\frac{G_2v_2}{2\rho_{\text{в.з}}S_{\text{щ}}}} = \sqrt{\frac{(G_0v_0 - G_1v_1)}{2(0,465P_{\text{в.з}}/(273,15 + t_{\text{в.з}}))S_{\text{щ}}}},$$

где G_i – массовый расход воздуха в i -й точке, кг/с , $G_i = Q_i\rho_i$; G_0 , G_1 и G_2 – массовый расход внешних утечек (подсасываемого) воздуха соответственно без учета действия воздушной завесы, при ее действии и исходящего из воздушной завесы, кг/с ; $S_{\text{щ}}$ – площадь щели вентилятора воздушной завесы, через которую выбрасывается поток воздуха; $\rho_{\text{в.з}}$, $P_{\text{в.з}}$, $t_{\text{в.з}}$ и $v_{\text{в.з}}$ – соответственно плотность (кг/м^3), давление (мм рт. ст.) и температура ($^{\circ}\text{C}$) воздуха, исходящего из воздушной завесы, и его скорость (м/с).

В случае, когда температуру и давление воздуха определить невозможно, плотность воздуха принимается равной $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Производительность воздушной завесы регулируется путем изменения площади щели $S_{\text{щ}}$ и/или за счет изменения угла выдачи воздуха из ее вентиляторов. Также может быть использован частотно-регулируемый привод управления вентиляторами.

Результаты моделирования процесса воздухоподготовки при использовании воздушной завесы в воздухоподающем стволе

Перед использованием воздушной завесы в воздухоподающем стволе необходимо определить эффективность предложенного способа, для чего в программном пакете SolidWorks Flow Simulation [29] произведено математическое моделирование влияния воздушной завесы на процесс проветривания и воздухоподготовки.

На рис. 4 приведены результаты моделирования процессов воздухоподготовки по способу, принятому в настоящее время (рис. 4, а), и при использовании воздушной завесы (рис. 4, б).

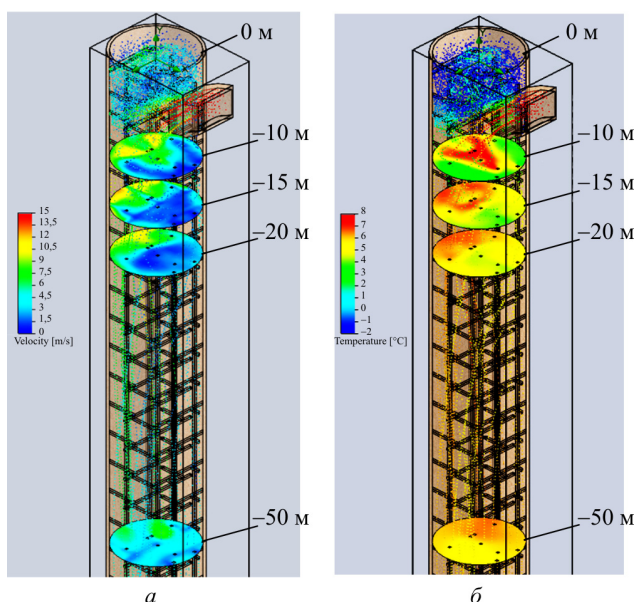


Рис. 4. Распределение температуры воздуха по сечению воздухоподающего ствола на разных глубинах путем смешивания холодного и теплого воздуха при использовании воздушной завесы, установленной в устье ствола: холодный воздух $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($20\text{ м}^3/\text{с}$), теплый воздух $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($147\text{ м}^3/\text{с}$): а – без воздушной завесы в воздухоподающем стволе; б – при использовании воздушной завесы в вентиляционном стволе

Как видно из рисунка, предлагаемый способ позволяет решить вышеуказанные проблемы, возникающие при воздухоподготовке.

В воздухоподающем стволе при использовании воздушной завесы отсутствуют зоны с температурой, близкой к $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. устранена угроза нарушения правил безопасности. При этом на работу ШКУ потребуется меньшее количество энергоресурсов, т.е. снизятся затраты на

воздухоподготовку. По сравнению с объемом энергоресурсов, расходуемых на работу ШКУ, затраты электроэнергии, расходуемой на работу воздушной завесы, несоизмеримо малы.

Равномерность прогрева воздуха позволит снизить общее значение температуры воздуха по всему сечению воздухоподающего ствола. В этом случае либо снизится значение отрицательных тепловых депрессий, действующих между стволами, либо изменится их направление на противоположное (положительные тепловые депрессии). Снижение объемов воздуха, подаваемого в рудник, приведет к тому, что режим работы ГВУ необходимо будет переводить в область более высоких давлений. При действии положительной естественной тяги, наоборот, в рудник будет подаваться больший объем воздуха, т.е. режим работы ГВУ можно перевести в область более низких давлений.

Происходит подобная ситуация при регулировании по следующей причине. При отсутствии общерудничной естественной тяги (общерудничной тепловой депрессии) кривая характеристики рудника занимает некое положение 1 (рис. 5). При этом ГВУ должно обеспечивать подачу воздуха Q_1 . Режим работы ГВУ в этом случае выбирается таким, чтобы рабочая точка (точка пересечения кривой характеристики рудника и характеристики вентилятора) попадала в область максимального КПД.

Изменение абсолютной величины общерудничной естественной тяги приведет к изменению положения кривой рудника в некоторое положение 2 (при отрицательной общерудничной естественной тяге – рис. 5, а; при положительной общерудничной естественной тяге – рис. 5, б).

Перевод вентилятора на другую характеристику приведет к изменению производительности вентилятора: при действии отрицательной общерудничной естественной тяги ($-h_e$) 0° (см. рис. 5, а); при действии положительной общерудничной естественной тяге ($+h_e$) -10° (см. рис. 5, б). При подобного рода регулировании в рудник будет подаваться объем воздуха Q_2 больше требуемого Q_1 , что влечет за собой дополнительные энергозатраты. Избежать дополнительных затрат электроэнергии можно за счет регулирования угла установки лопаток осевого направляющего аппарата (ОНА) до некоторого положения X^0 (см. рис. 5). Однако с точки зрения исполнения это достаточно сложно, и с учетом того, что общерудничная

естественная тяга меняется постоянно и довольно в широких пределах [12], может давать ошибку при корректировке угла установки лопаток ОНА. Кроме того, перевод

вентилятора на другую рабочую характеристику неизбежно повлечет за собой снижение КПД (см. рис. 5), в связи с чем ГВУ будет потреблять большее количество электроэнергии.

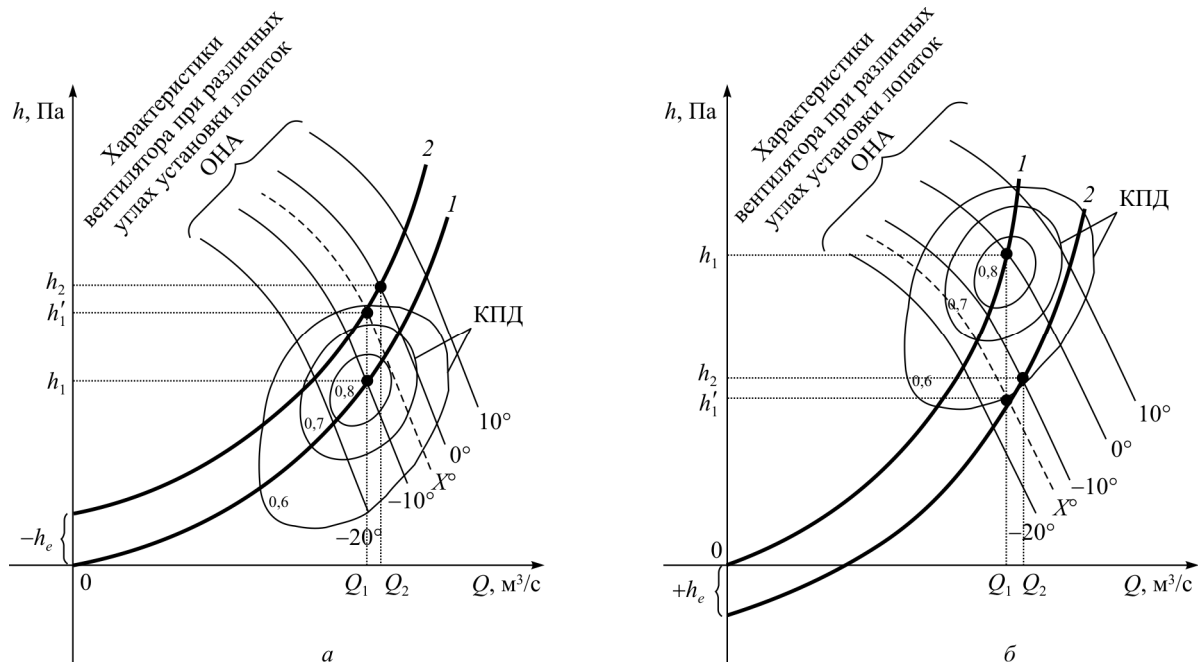


Рис. 5. Изменение положения кривой характеристики рудника: *a* – при действии отрицательной общерудничной естественной тяги; *б* – при действии положительной общерудничной естественной тяги

Изменения производительности ГВУ можно добиться путем регулирования скорости вращения рабочего колеса вентилятора. Для этой цели может использоваться регулируемый электропривод, в процессе работы которого за счет обратной связи по скорости и току будет поддерживаться требуемая производительность [30]. При этом система управления привода будет регулироваться таким образом, чтобы вентилятор работал с максимальным КПД. Однако и при подобном регулировании общерудничная естественная тяга будет оказывать существенное влияние на работу ГВУ.

Результаты моделирования процесса проветривания при использовании воздушной завесы в вентиляционном стволе

В ходе математического моделирования процесса работы воздушной завесы в вентиляционном стволе (рис. 6) было установлено, что при принятых условиях внешние утечки воздуха снизятся с 60,43 до 26,27 м³/с, т.е. примерно на 43,5 %, а на работу ГВУ вместо 444,36 м³/с, потребуется 409,46 м³/с.

Вследствие изменения структуры воздушных потоков воздуха в месте действия воздушной завесы создаются два рециркуляционных

контура, которые обеспечивают дополнительное аэродинамическое сопротивление в устье вентиляционного ствола от нулевой отметки до сопряжения с вентиляционным каналом, что способствует уменьшению величины внешних утечек. При этом наличие перегородки в стволе обеспечивает максимальную эффективность работы воздушной завесы.

Для каждого конкретного случая требуется провести поиск оптимального режима работы вентиляторов воздушной завесы и ГВУ исходя из следующих показателей:

- количество воздуха, подаваемого в рудник, не должно быть меньше расчетного количества воздуха, необходимого для проветривания рудника;
- затраты на воздушную завесу не должны превышать затраты ГВУ на внешние утечки воздуха;
- стоимость одного кубометра свежего воздуха, подаваемого в рудник, должна быть минимальной.

На рис. 7 приведены характеристики вентилятора ГВУ, характеристики сети рудника, рабочие точки без действия воздушной завесы (рабочая точка А) и при сокращении поверхностных утечек с помощью воздушной завесы (рабочая точка С).

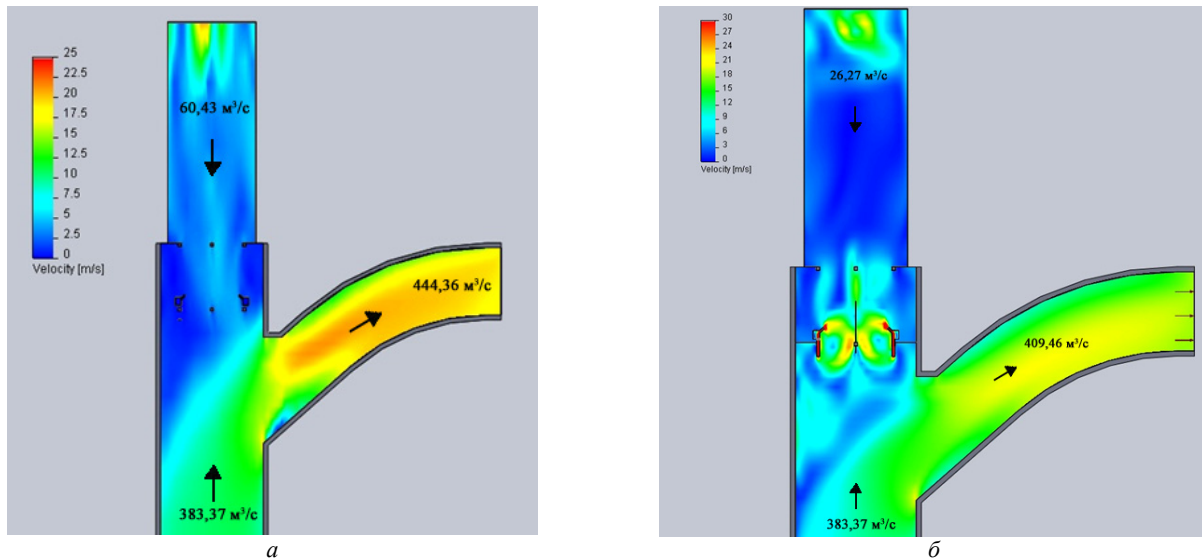


Рис. 6. Результат математического моделирования распределения воздушных потоков в вентиляционном стволе: *а* – без воздушной завесы в воздухоподающем стволе; *б* – при использовании воздушной завесы в вентиляционном стволе

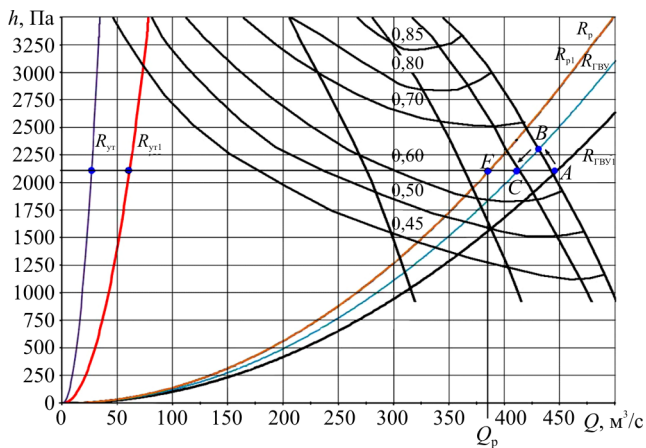


Рис. 7. Аэродинамические характеристики: $R_{ут1}$ – аэродинамическое сопротивление внешних утечек воздуха до установки воздушной завесы; $R_{ут}$ – аэродинамическое сопротивление внешних утечек воздуха после установки воздушной завесы; $R_{ГВУ1}$ – аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети до установки воздушной завесы; $R_{ГВУ}$ – аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети после установки воздушной завесы; R_p , R_{p1} – аэродинамическое сопротивление рудника сети до и после установки воздушной завесы; *A*, *B*, *C* – рабочие точки вентилятора при различных режимах его работы; *F* – количество свежего воздуха, поступающее в рудник

За счет действия воздушной завесы происходит следующее: увеличивается аэродинамическое сопротивление участка ствола от нулевой отметки до сопряжения с вентиляционным стволом, вследствие чего увеличивается аэродинамическое сопротивление внешних утечек воздуха с $R_{ут1}$ до $R_{ут}$ (см. рис. 7). При этом аэродинамическое сопротивление рудника R_p , R_{p1} остается

неизменным, а аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети с $R_{ГВУ1}$ до $R_{ГВУ}$, на которое работает ГВУ, увеличивается.

Рабочая точка вентилятора ГВУ *A* перемещается по аэродинамической характеристике вентилятора в точку *B*. После перемещения рабочей точки вентилятора ГВУ *B* в точку *C* за счет изменения угла установки лопаток ОНА количество свежего воздуха, поступающего в рудник, Q_p остается неизменным (*F*), а потребляемая ГВУ электроэнергия снижается.

Количество электроэнергии (кВт·ч), сэкономленной в результате действия воздушной завесы в вентиляционном стволе, согласно [31], определяется по формуле

$$N_c = \frac{T}{1000\eta_d} \left[\frac{Q_B h_B}{\eta_B} - \frac{Q'_B h'_B}{\eta'_B} \right] - \frac{2TQ_{B.3} h_{B.3}}{1000 \cdot \eta_{д.3} \eta_{B.3}},$$

где T – время работы вентилятора в год, ч; η_d – КПД электродвигателя ГВУ, о.е.; Q_B , h_B – производительность ГВУ, m^3/c , и развиваемое ей давление, Па; $Q_{B.3}$, $h_{B.3}$ – производительность вентилятора воздушной завесы, m^3/c , и развиваемое им давление, Па; $\eta_{д.3}$ – КПД электродвигателя воздушной завесы, о.е.; $\eta_{B.3}$ – статический КПД вентилятора воздушной завесы, о.е.

Для каждого конкретного случая значение сэкономленной электроэнергии необходимо рассчитывать, однако очевиден факт эффективности применения в вентиляционном стволе воздушной завесы с целью повышения энергоэффективности проветривания.

Заключение

Как было установлено в ходе математического моделирования, при использовании воздушной завесы при воздухоподготовке в воздухоподающем стволе наблюдается практически равномерный прогрев воздуха по всему его сечению. При этом за счет снижения объема подсосываемого воздуха через надшахтное здание воздухоподающего ствола появляется возможность снизить температуру исходящего из ШКУ потока, в результате чего будут снижаться затраты энергоресурсов, расходуемых на воздухоподготовку.

За счет снижения температуры воздуха, подаваемого в воздухоподающие стволы,

между ними уменьшатся отрицательные (увеличатся положительные) тепловые депрессии (общерудничная естественная тяга), в результате чего появится возможность снизить производительность ГВУ при соблюдении правил безопасности.

Кроме этого на снижение производительности ГВУ при поддержании подачи требуемого объема воздуха в рудник влияет снижение внешних утечек воздуха, которого также возможно добиться путем установки воздушной завесы в вентиляционном стволе.

Таким образом, предлагаемый способ проветривания позволит не только осуществлять воздухоподготовку в безопасном режиме, но и снизить затраты энергоресурсов на данный процесс.

Библиографический список

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Серия 03. Вып. 78. / Науч.-техн. центр исследований проблем промышленной безопасности. – М., 2014. – 276 с.
2. Результаты математического моделирования смешивания холодного и теплого потоков воздуха в воздухоподающем стволе рудника / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, А.А. Каменских, А.И. Петров // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 12. – С. 31–33.
3. Результаты исследования системы вентиляции рудника БКПРУ-2 в холодное время года / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, А.А. Каменских, А.П. Тронин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – № 3. – С. 89–96.
4. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in air supply shaft in underground mine / N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.I. Petrov // Eurasian Mining. – 2016. – № 2. – P. 45–47. DOI: 10.17580/em.2016.02.11
5. Николаев А.В. Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2012. – 20 с.
6. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 522 с.
7. Bruce W.E. Natural draft: its measurement and modeling in underground mine ventilation systems / Dept. of Labor, Mine Safety and Health Administration. – US, 1986. – 34 p.
8. Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1999. – Vol. 31. – P. 201–238. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.201
9. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model / Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang // Tunneling and Underground Space Technology. – 2015. – Vol. 45. – P. 166–180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004
10. Van Ulden A.P., Holtslag A.M. Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications // J. Clim. Appl. Meteorol. – 1985. – Vol. 24. – P. 1196–1207. DOI: 10.1175/1520-0450(1985)024<1196:EOABLP>2.0.CO;2
11. Alymenko N.I., Nikolaev A.V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts // Journal of Mining Science – 2011. – Vol. 47, № 5. – P. 636–642. DOI: 10.1134/S1062739147050121
12. Lyal'kina G. B., Nikolaev A.V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 342–346. DOI: 10.1134/S1062739115020180
13. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface // Eurasian Mining. – 2016. – № 2. – P. 41–44. DOI: 10.17580/em.2016.02.10
14. Krainov A.V., Pashkov E.N., Ponomaryov A.V. Conjugate heat transfer in the interaction of the viscous liquid with technological elements of energy systems in conditions of their internal contour moving // Advanced Materials Research. – 2014. – 1040. – P. 876–880. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.876
15. Каменских А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Горн. ин-т УрО РАН. – Пермь, 2011. – 19 с.
16. Внешние утечки воздуха на калийных рудниках ВКМКС / Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, А.В. Николаев, В.А. Николаев, А.И. Петров // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2016. – № 1. – С. 194–201.
17. Способ проветривания подземного горнодобывающего предприятия: пат. 2601342 Рос. Федерация, МПК E21F1/08; E21F3/00 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Каменских А.А.; заявл. 22.09.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. – 12 с.
18. Повышение эффективности процесса воздухоподготовки за счет использования воздушной завесы в воздухоподающем стволе / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, В.А. Николаев, А.И. Петров // Актуальные проблемы повышения

эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2016. – № 1. – С. 209–213.

19. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts / A. Nikolaev, N. Alymenko, A. Kamenskikh, V. Nikolaev // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 15: The 1st Scientific Practical Conference «International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza). – P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004

20. Устройство для создания воздушной завесы: пат. 136490 Рос. Федерация, МПК E21F 1/16, F24F 9/00 / Алыменко Н.И., Каменских А.А.; заявл. 08.08.2013; опублик. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 2 с.

21. Эльтерман В.М. Воздушные завесы. – М.: Машиностроение, 1966. – 164 с.

22. Татарчук Г.Т. Уточненная методика расчета воздушных завес // Отопление и вентиляция промышленных и сельскохозяйственных зданий. – М., 1966. – № 16. – С. 66–72.

23. Mac Farlane D. Ventilation Engineering. – Belfast, 1965. – 324 p.

24. Сычев А.Т. К расчету воздушных завес // Водоснабжение и санитарная техника. – 1974. – № 2. – С. 22–24.

25. Шепелев И.А. Основы расчета воздушных завес, приточных струй и пористых фильтров. – М.: Стройиздат, 1950. – 150 с.

26. Тимухин С.А., Белов С.В. Определение оптимальной скорости воздуха в каналах главных вентиляторных установок // Известия вузов. Горный журнал. – 1981. – № 7. – С. 89–91.

27. Состояние проветривания шахт Урала / К.Н. Коренной, Г.М. Мокрецов, Н.Н. Коренной, И.С. Панов, С.И. Юдин, В.В. Токмаков // Известия вузов. Горный журнал. – 2006. – № 4. – С. 47–50.

28. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 324 с.

29. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

30. Васильев Е.М., Николаев А.В., Королев Н.А. Система управления электроприводом нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса для поддержания теплового режима в шахтных стволах // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 1 (110). – С. 20–24.

31. Алыменко Н.И. Исследование работы вентиляторных установок главного проветривания и разработка мероприятий по повышению эффективности их эксплуатации применительно к условиям калийных рудников: дис. ... канд. тех. наук. – Л., 1982. – 229 с.

References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Pravila bezopasnosti pri vedenii gornyx rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh" [Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Safety rules for mining and processing of solid minerals"]. Seriya 03, iss.78. Moscow, Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniia problem promyshlennoi bezopasnosti, 2014, 276 p.

2. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A., Petrov A.I. Rezul'taty matematicheskogo modelirovaniia smeshivaniia kholodnogo i teplogo potokov vozdukh v vozdukhopodaiushchem stvole rudnika [Results of mathematical modeling of mixing cold and warm air flows in the air supply shaft of the mine]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2014, no.12, pp.31-33.

3. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A., Tronin A.P. Rezul'taty issledovaniia sistemy ventilatsii rudnika BKPRU-2 v kholodnoe vremia goda [Results of a study of the BKPRU-2 mine ventilation system in the cold season]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2011, no.3, pp.89-96.

4. Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Nikolaev A.V., Petrov A.I. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in air supply shaft in underground mine. *Eurasian mining*, 2016, no.2, pp.45-47. DOI: 10.17580/em.2016.02.11

5. Nikolaev A.V. Upravlenie teplovymi depressiyami v sistemakh ventilatsii kaliinykh rudnikov [Management of thermal depressions in potash mine ventilation systems]. Abstract of Ph. D. thesis. Perm', 2012, 20 p.

6. Starkov L.I., Zemskov A.N., Kondrashev P.I. Razvitie mekhanizirovannoi razrabotki kaliinykh rud

[Development of mechanized development of potash ores]. Perm', Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007, 522 p.

7. Bruce W.E. Natural draft: its measurement and modeling in underground mine ventilation systems. US, Dept. of Labor, Mine Safety and Health Administration, 1986, 34 p.

8. Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, vol.31, pp.201-238. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.201

9. Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, vol.45, pp.166-180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004

10. Van Ulden, Holtslag A. Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 1985, vol.24, pp.1196-1207. DOI: 10.1175/1520-0450(1985)024<1196:EOABLP>2.0.CO;2

11. Alymenko N.I., Nikolaev A.V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts. *Journal of Mining Science*, 2011, vol.47, no.5, pp.636-642. DOI: 10.1134/S1062739147050121

12. Lyal'kina G.B., Nikolaev A.V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient. *Journal of Mining Science*, 2015, vol.51, no.2, pp.342-346. DOI: 10.1134/S1062739115020180

13. Gendler S.G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface. *Eurasian Mining*, 2016, no.2, pp.41-44. DOI: 10.17580/em.2016.02.10

14. Krainov, A.V., Pashkov, E.N., Ponomaryov, A.V. Conjugate heat transfer in the interaction of the viscous liquid with technological elements of energy systems in conditions of their internal contour moving. *Advanced Materials Research*, 2014, 1040, pp.876-880. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.876
15. Kamenskikh A.A. Razrabotka metodov kontroliia i snizheniia poverkhnostnykh utechek vozdukha na rudnikakh [Development of methods for control and reduction of surface air leaks in mines]. Abstract of Ph. D. Thesis. Пермь, 2011, 19 p.
16. Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Nikolaev A.V., Nikolaev V.A., Petrov A.I. Vneshnie utechki vozdukha na kaliinykh rudnikakh VKMKS [External air leaks at potash mines VKMKS]. *Aktual'nye problemy povysheniia effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniia*, 2016, no.1, pp.194-201.
17. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Nikolaev V.A., Kamenskikh A.A. Sposob provetrivaniia podzemnogo gornodobyvaiushchego predpriiatiia [Method for ventilating an underground mining enterprise]. Patent 2601342. Russian Federation.
18. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Nikolaev V.A., Petrov A.I. Povyshenie effektivnosti protsessa vozdukhopodgotovki za schet ispol'zovaniia vozduшной zavesy v vozdukhopodaiushchem stvole [Improving the efficiency of the air preparation process by using an air curtain in the air supply barrel]. *Aktual'nye problemy povysheniia effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniia*, 2016, no.1, pp.209-213.
19. Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 15: The 1st Scientific Practical Conference "International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza)", 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004
20. Alymenko N.I., Kamenskikh A.A. Ustroistvo dlia sozdaniia vozduшной zavesy [Device for creating an air curtain]. Patent 136490 Russian Federation.
21. El'terman V.M. Vozdushnye zavesy [Air curtains]. Moscow, Mashinostroenie, 1966, 164 p.
22. Tatarchuk G.T. Utochnennaia metodika rascheta vozduшnykh zaves [Refined methodology for calculating air curtains]. Otoplenie i ventilatsiia promyshlennykh i sel'skokhoziaistvennykh zdanii. Moscow, 1966, no.16, pp.66-72.
23. Mac Farlane D. Ventilation engineering. Belfast, 1965, 324 p.
24. Sychev A.T. K raschetu vozduшnykh zaves [To the calculation of air curtains]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika*, 1974, no.2, pp.22-24.
25. Shepelev I.A. Osnovy rascheta vozduшnykh zaves, pritochnykh strui i poristykh fil'trov [Basics of calculating air curtains, supply air jets and porous filters]. Moscow, Stroizdat, 1950, 150 p.
26. Timukhin S.A., Belov S.V. Opredelenie optimal'noi skorosti vozdukha v kanalakh glavnykh ventilatornykh ustanovok [Determination of the optimum air velocity in the ducts of the main fan units]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 1981, no.7, pp.89-91.
27. Korennoi K.N., Mokretsov G.M., Korennoi N.N., Panov I.S., Iudin S.I., Tokmakov V.V. Sostoianie provetrivaniia shakht Urala [The state of ventilation of the mines of the Urals]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2006, no.4, pp.47-50.
28. Mokhirev N.N., Rad'ko V.V. Inzhenernye raschety ventilatsii shakht. Stroitel'stvo. Rekonstruktsiia. Ekspluatatsiia [Engineering calculations of mine ventilation. Building. Reconstruction. Exploitation]. Moscow, Nedra-Biznesssentr, 2007, 324 p.
29. Aliamovskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V. et al. SolidWorks 2007/2008. Komp'uternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2008, 1040 p.
30. Vasil'ev E.M., Nikolaev A.V., Korolev N.A. Sistema upravleniia elektroprivodom nagnetatel'nykh ventilatorov i setevogo nasosa dlia podderzhaniia teplovogo rezhima v shakhtnykh stvolakh [The control system for the electric drive of the blowers and the network pump for maintaining the thermal regime in the shafts]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2015, no.1(110), pp.20-24.
31. Alymenko N.I. Issledovanie raboty ventilatornykh ustanovok glavnogo provetrivaniia i razrabotka meropriatii po povysheniiu effektivnosti ikh ekspluatatsii primenitel'no k usloviyam kaliinykh rudnikov [Research of the operation of ventilating installations of main ventilation and development of measures to increase the efficiency of their operation in relation to the conditions of potash mines]. Ph. D. thesis. Leningrad, 1982, 229 p.

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Результаты моделирования процесса проветривания рудника при расположении воздушной завесы в воздухоподводящем и вентиляционном стволах / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, Ш.К. Фет, В.А. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №3. – С.291–300. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.10

Please cite this article in English as:

Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A., Fet S.K., Nikolaev V.A. Results of modelling of mine ventilation with air curtain installed into downcast and upcast shafts. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.3, pp.291-300. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.10