

УДК 622.454.2:622.81

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОВЕТРИВАНИИ ШАХТ И РУДНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СИСТЕМУ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА

**А.В. Николаев, Н.И. Алыменко<sup>1</sup>, М. Чехлар<sup>2</sup>, Ю. Яночко<sup>2</sup>, Д.Н. Алыменко<sup>3</sup>, В.А. Николаев**

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

<sup>1</sup>Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

<sup>2</sup>Технический университет Кошице (04200, Словакия, г. Кошице, ул. Летна, 9)

<sup>3</sup>АО «ВНИИ Галургии» (614002, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 94)

## ENSURING THE SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION OF SHAFTS AND MINES THAT USE THE AIR RECYCLING SYSTEM

**Aleksandr V. Nikolaev, Nikolaj I. Alymenko<sup>1</sup>, Mikhail Chekhar<sup>2</sup>, Yurai Janocko<sup>2</sup>, Daniil N. Alymenko<sup>3</sup>, Viktor A. Nikolaev**

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

<sup>1</sup>Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78 Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

<sup>2</sup>Technical University of Kosice (9 Letna st., Kosice, 04200, Slovak Republic)

<sup>3</sup>Ural Research and Development Institute of halurgy JSC (94 Sibirskaya st., Perm, 614002, Russian Federation)

Получена / Received: 07.08.2017. Принята / Accepted: 12.10.2017. Опубликовано / Published: 01.12.2017

### Ключевые слова:

рециркуляция, главная вентиляционная установка, реверс струи воздуха, безопасность ведения горных работ, энергосбережение.

Приводится описание возможных отказов в системе автоматизации проветривания при частичном повторном использовании исходящего из шахты или рудника воздуха (при рециркуляции). В существующих системах проветривания, использующих рециркуляцию в главных вентиляционных выработках, по которым осуществляется выдача воздуха из подземного горнодобывающего предприятия, предлагается устанавливать автоматические вентиляционные двери (АВД). С их помощью обеспечивается изменение аэродинамического сопротивления рудника, т.е. регулируется расход выдаваемого из рудника (шахты) воздуха. При выходе из строя АВД даже в нормальном режиме проветривания может возникнуть опасная ситуация, связанная с тем, что указанные средства отрицательного регулирования могут преградить основной путь движения воздуха. В этом случае через рециркуляционный контур воздух из воздухоподводящих стволов направится в вентиляционный ствол, минуя горные выработки, предназначенные для проветривания. В момент возникновения аварии, при реверсе главной вентиляционной установки (ГВУ), подобный отказ делает ситуацию еще более опасной ввиду непредсказуемости пути движения дымовых газов. В описанном в работе способе предлагается АВД устанавливать в выработках главных направлений и закрывать их только в период осуществления реверса ГВУ. При совместной работе закрывающихся АВД и нагнетательных вентиляторов шахтной калориферной установки, осуществляющих в этот момент выдачу воздуха в реверсивном режиме, снижается время на реализацию процесса перевода ГВУ в реверсивный режим. После постепенного открытия АВД в шахте (руднике) будет установлен реверсивный режим проветривания. В предлагаемом способе обеспечивается энерго- и ресурсосбережение при проветривании и воздухоподготовке как в нормальном, так и в аварийном режимах при соблюдении требований безопасности ведения горных работ.

### Key words:

recirculation, main ventilation unit, air stream reverse, mining safety, energy saving.

The paper describes the possible failures in the automation ventilation system with partial return use of upcast air from a shaft or mine (during recirculation). Existing ventilation systems use recirculation in the main ventilation mining, through which air is delivered from an underground mining enterprise. It is proposed to install automatic ventilation doors (AVD). They allow to change the aerodynamic resistance of the mine, i.e. control flow rate of air discharged from a mine (shaft). If an AVD is damaged the dangerous case could arise even in a normal ventilation mode due to the fact that mentioned negative control means can block the main path of air movement. In this case air from the air-supplying barrels is directed to the ventilation barrel through the recirculation loop bypassing the mining sites dedicated for ventilation. At the time of accident, when the main fan unit (MFU) is reversed, such a failure makes the situation even more dangerous due to the unpredictable path of flue gases.

In the method described it is proposed to install the AVD in the mines of the main directions and close them only during the period of the MFU reverse. When the closing AVD and forced draft fan of the main air heater work together and discharge air in the reverse mode, the time dedicated for switching of the main heater to the reverse mode is reduced. After the gradual opening of the AVD in the shaft (mine) a reversible mode of ventilation is installed.

The method proposed allows energy and resource savings for ventilation and air preparation both in normal and emergency modes while meeting the safety requirements for mining operations.

**Николаев Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (mob. tel.: +007 908 24 140 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 (mob. tel.: +007 912 789 80 86, e-mail: nik.alymenko@yandex.ru).

**Чехлар Михаил** – доктор технических наук, профессор, декан факультета горного дела, экологии, менеджмента и геотехнологий (mob. tel.: +421 055 602 31 36, e-mail: michal.cehlar@tuke.sk).

**Яночко Юрай** – доктор технических наук, профессор, заместитель декана по исследованиям, науке и послевузовскому образованию факультета горного дела, экологии, менеджмента и геотехнологий (mob. tel.: +421 0 915 865 144, e-mail: juraj.janocko@tuke.sk).

**Алыменко Даниил Николаевич** – кандидат технических наук, директор научной части (rab. tel.: +007 342 216 68 17, e-mail: mail@gallurgy.ru).

**Николаев Виктор Александрович** – старший преподаватель кафедры горной электромеханики (mob. tel.: +007 906 877 22 28, e-mail: nikolaev.va.pstu@mail.ru).

**Aleksandr V. Nikolaev** (Author ID in Scopus: 7202396660) – 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 for correspondence.

**Nikolaj 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).

**Mikhail Chekhar** – Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies (mob. tel.: +421 055 602 31 36, e-mail: michal.cehlar@tuke.sk).

**Yurai Janocko** – Doctor of Engineering, Professor, Deputy Dean for Research, Sciences and Postgraduate Education at the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies (mob. tel.: +421 0 915 865 144, e-mail: juraj.janocko@tuke.sk).

**Daniil N. Alymenko** – PhD in Engineering, Director for Science (tel.: +007 342 216 68 17, e-mail: mail@gallurgy.ru)

**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

В Российской Федерации и в мире с каждым годом все более актуальным становится вопрос энергосбережения, в связи с чем во всех отраслях промышленности производится модернизация используемого оборудования, способов производства, технологии изготовления и иные мероприятия.

Для горной промышленности, являющейся энерго- и ресурсоемкой, настоящий вопрос также является актуальным, и для его решения изыскиваются способы повышения энергоэффективности производства. Ввиду того что от 30 до 50 % всей потребляемой подземным горнодобывающим предприятием электроэнергии расходуется на проветривание [1], именно в этой области необходимо провести модернизацию с целью повышения энергоэффективности работы указанной отрасли промышленности.

На подземных горнодобывающих предприятиях еще в 30-х гг. прошлого столетия предложено частичное повторное использование (рециркуляция) воздуха, когда определенная его часть, исходящая из шахты (рудника), снова отправляется на свежую струю [2–11]. В этом случае значительно снижаются затраты электроэнергии на работу главной вентиляторной установки (ГВУ). Также появляется возможность снизить затраты энергетических ресурсов при воздухоподготовке в холодное время года и избавиться в неглубоких шахтах и рудниках от необходимости применения в теплое время года системы кондиционирования воздуха, являющейся энергоемкой [12–14].

Ввиду того что в настоящее время все процессы в производстве стремятся перевести в автоматический или полуавтоматический (автоматизированный) режимы, именно в одном из них в работах [14–18] предложено управлять процессом проветривания с применением контура рециркуляции.

С целью обеспечения энергосбережения при проветривании шахт и рудников, в которых применяется система рециркуляции, необходимо автоматизировать процесс управления воздухо-распределением и осуществлять контроль работы всех элементов системы. Однако перед разработкой самого алгоритма управления необходимо рассмотреть все факторы, которые помимо энергосбережения будут влиять на самый главный – безопасность ведения горных работ.

## Осуществление проветривания рудника (шахты) с применением системы рециркуляции в нормальном и аварийном режимах

В нормальном режиме проветривания при применении системы частичного повторного использования воздуха необходимо определить коэффициент рециркуляции, который согласно [19, 20] имеет зависимость

$$K_{\text{рец}} = \frac{Q_{\text{рец}}}{(Q_{\text{ш}} + Q_{\text{рец}})},$$

где  $Q_{\text{рец}}$  – объем рециркулирующего воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{ш}}$  – общий объем воздуха, поступающего в шахту (рудник), м<sup>3</sup>/с.

В работе [15] поддерживать требуемый максимально допустимый коэффициент рециркуляции  $K_{\text{рец}}^{\text{max}}$  предлагается за счет управления скоростью вращения рабочего колеса рециркулирующего вентилятора ( $\omega_{\text{рец}}$ ) в зависимости от текущего значения коэффициента рециркуляции ( $K_{\text{рец}}$ ):

$$\frac{d\omega_{\text{рец}}}{dt} = a(K_{\text{рец}}^{\text{max}} - K_{\text{рец}}(t)) + b \int (K_{\text{рец}}^{\text{max}} - K_{\text{рец}}(t)) dt,$$

где  $a$  и  $b$  – весовые коэффициенты уравнения.

Для поддержания требуемых параметров рециркуляции в работе [15] также предлагается установить автоматические шахтные вентиляционные двери (АВД) в главных вентиляционных выработках.

С точки зрения обеспечения энергосбережения эффективность подобного способа проветривания не вызывает сомнения. Однако в случае возникновения нештатной ситуации при применении указанного способа могут возникнуть определенные проблемы. Например, при пожаре в подземных горных выработках согласно [21] в течение 10 минут необходимо произвести реверсирование (смену направления) струи воздуха в шахте (руднике). В этом случае в течение указанного времени воздух продолжает двигаться в установившемся ранее направлении. После этого ГВУ включается в реверсивный режим, и воздух начинает по вентиляционному стволу поступать в шахту (рудник).

*Ситуация № 1. При реверсе струи в шахте (руднике), работающей по всасывающему способу проветривания с частичным повторным использованием воздуха, вышли из*

стройка АВД, находящиеся в рециркуляционном контуре «горизонта» – остались в открытом положении (рис. 1, а).

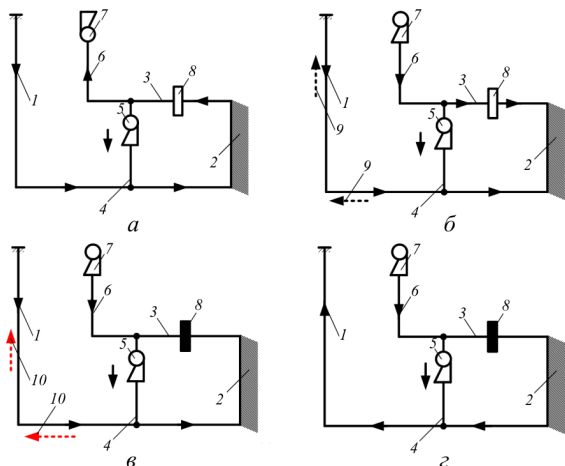


Рис. 1. Упрощенная схема проветривания рудника при применении системы рециркуляции: заклинивание АВД в открытом (а, б) и закрытом (в, г) положении: 1 – воздухоподающий ствол; 2 – выработанное пространство и добычные участки; 3 – главные вентиляционные выработки; 4 – рециркуляционный контур; 5 – рециркуляционный вентилятор; 6 – вентиляционный ствол; 7 – ГВУ; 8 – АВД; 9 – требуемое направление движения воздуха при реверсии; 10 – направление движения дымовых газов

В этом случае до включения в реверсивный режим ГВУ, даже при выключенном рециркуляционном вентиляторе, часть исходящего из рудника воздуха будет поступать на свежую струю. Ввиду того что после возникновения пожара в исходящем воздухе могут присутствовать дымовые газы в опасной концентрации, подобная ситуация может стать опасной для жизни и здоровья горнорабочих, находящихся в шахте (руднике).

Как уже было сказано, перевод ГВУ в реверсивный режим должен быть осуществлен не более чем за 10 минут, т.е. рассматриваемая ситуация не должна вызвать существенную опасность. Однако в работах [22, 23] установлено, что после реверса ГВУ изменяется направление движения воздуха только в вентиляционном стволе и главных вентиляционных выработках. Связано это с тем, что выработанные пространства в это время начинают играть роль источников тяги и в воздухоподающих стволах и выработках главных направлений воздух продолжает двигаться в том же направлении, установившемся ранее (см. рис. 1, б).

Нетрудно заметить, что при заклинивании АВД в рециркуляционном контуре в открытом положении воздух из вентиляционного ствола будет поступать в выработанное пространство. Подобная ситуация будет способствовать увеличению времени перевода режима проветривания в реверсивный режим. В это время дымовые газы не только не будут выходить из подземной части горнодобывающего предприятия, но и в результате продолжения процесса горения будут в ней накапливаться [24–29].

Подобная ситуация возникает и в штатном режиме работы АВД. При попытке их закрыть на определенный угол увеличивается аэродинамическое сопротивление главных вентиляционных выработок, что станет препятствием в работе ГВУ. Исходя из этого следует, что при заклинивании АВД в открытом положении предложенная система автоматизации проветривания не защищает горнорабочих от возникновения нештатной ситуации (пожара в подземных горных выработках).

*Ситуация № 2. При реверсе струи в шахте (руднике), работающей по всасывающему способу проветривания с частичным повторным использованием воздуха, вышли из строя АВД в закрытом положении.*

Как было указано ранее, заклинивание АВД в открытом положении, по сути, является штатным режимом работы и как не препятствует режиму реверсирования струи, так и не способствует ему. Куда более опасная ситуация возникает при заклинивании АВД в закрытом положении. В этом случае через рециркуляционный контур воздух из вентиляционного ствола напрямую начнет поступать в выработки главных направлений и воздухоподающий ствол (см. рис. 1, в). При этом до смены направления движения воздуха в воздухоподающих стволах за счет заполнения выработанного пространства очаг пожара в горных выработках будет снабжаться свежим воздухом. При смене направления движения струи воздуха в воздухоподающих стволах дымовые газы пойдут через них на поверхность (см. рис. 1, в), т.е. заполнят все горные выработки, в которых будут находиться люди.

Еще более опасная ситуация возникает, когда пожар образуется в околоствольном дворе воздухоподающего ствола или в нем самом. В этом случае шанса, что под землей останутся горные выработки, изолированные от попадания в них дымовых газов, в которых отсутствуют горнорабочие, практически не остается.

Ситуация заклинивания АВД в закрытом положении опасна и в нормальном режиме проветривания, так как в этом случае будет перекрываться доступ к основному, а иногда единственному источнику проветривания – ГВУ, осуществляющей подачу воздуха в рудник (шахту). При этом воздух из воздухоподающих стволов через рециркуляционный контур начнет поступать напрямую в вентиляционный ствол, минуя добычные участки с горнорабочими.

При реверсе ГВУ также через рециркуляционный контур воздух направится в воздухоподающий ствол, нарушив воздухораспределение в выработках (см. рис. 1, 2). После выхода воздуха из выработанного пространства направить в выработки свежий воздух будет невозможно, так как он в любом случае при включении ГВУ в нормальном (неревверсивном) режиме пойдет по кратчайшему пути из воздухоподающих стволов в вентиляционный ствол через рециркуляционный контур либо в обратном направлении.

Рассмотренные ситуации указывают на то, что при использовании АВД в главных вентиляционных выработках и системы рециркуляции воздуха можно добиться снижения затрат энергоресурсов на проветривание за счет уменьшения производительности ГВУ и общего объема поступающего в шахту (рудник) воздуха (на воздухоподготовку). При возникновении нештатной ситуации, например пожара, указанная система проветривания в некоторых случаях создаст опасные условия для жизни и здоровья горнорабочих.

### Предлагаемый способ автоматизации проветривания с использованием системы рециркуляции

Как было указано ранее, обеспечению безопасности при возникновении нештатной ситуации (при пожаре) в системе с использованием рециркуляции препятствует два фактора: выработанное пространство в подземной части горно-добывающего предприятия, начинающее играть роль источника тяги при реверсии ГВУ, и наличие изолирующих устройств (АВД) в главных вентиляционных выработках в случае выхода их из строя. Эти же факторы, но в меньшей степени, будут влиять на безопасность в системе проветривания без частичного повторного использования воздуха.

Кроме того, наличие в главных вентиляционных выработках АВД, которые в процессе выхода из строя могут преградить путь для подачи воздуха в рабочие зоны, делает

опасным их применение и в штатном режиме проветривания.

Повысить степень безопасности при обеспечении энерго- и ресурсосбережения процесса проветривания и воздухоподготовки за счет системы рециркуляции можно, если АВД располагать не в главных вентиляционных выработках, а в выработках главных направлений (рис. 2) [30].

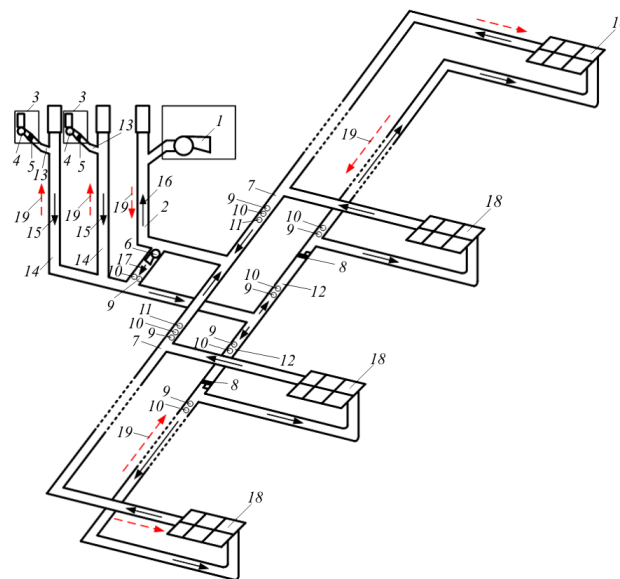


Рис. 2. Схема проветривания рудника при использовании системы рециркуляции по предлагаемому способу: 1 – ГВУ; 2 – вентиляционный ствол; 3 – здание шахтной калориферной установки (ШКУ); 4 – вентилятор ШКУ; 5 – теплообменник ШКУ; 6 – рециркуляционный вентилятор; 7 – главные вентиляционные выработки; 8 – автоматические вентиляционные двери; 9 – датчик расхода воздуха; 10 – датчики состава воздуха; 11 – датчики давления и температуры (или плотномер); 12 – выработки главных направлений; 13 – калориферный канал; 14 – воздухоподающий ствол; 15 – поступающий воздух; 16 – выдаваемый воздух; 17 – рециркуляционный воздух; 18 – добычные участки; 19 – требуемое направление движения воздуха при реверсе ГВУ

В штатном режиме система будет осуществлять частичную подачу воздуха, исходящего из рудника (шахты) обратно на свежую струю. Объемный расход рециркулируемого воздуха будет зависеть от степени его загрязненности (определяется датчиками состава воздуха 10 на рис. 2). В отличие от рассматриваемой ранее системы проветривания, производительность ГВУ будет регулироваться с учетом действия общерудничной (общешахтной) естественной тяги (тепловой депрессии), возникающей между шахтными стволами. Как было установлено в работах [31–34], при подобном



способе управления можно добиться сокращения затрат на проветривание от 11 до 32 % (для калийных рудников). В этом случае АД находятся в открытом положении, а управление воздухораспределением осуществляется за счет использования вентиляторов или изолирующих устройств на участках.

Режим работы системы и необходимость реверса ГВУ определяются заранее в зависимости от места возникновения пожара в период проведения плана ликвидации аварий. Соответствующая информация заносится в память программируемого контроллера (ПЛК), который (которые) будет управлять процессом проветривания.

Сигнал на закрытие АД поступает с ПЛК в момент, когда необходимо в руднике (шахте) обеспечить реверсивный режим проветривания. С целью предотвращения пневмоудара АД закрываются плавно, преграждая тем самым путь движению воздуха в выработанное пространство через воздухоподающие стволы. Рециркуляционная установка в это время продолжает работать. При этом включаются (в реверсивном режиме) отключенные в теплое время года либо переводятся в реверсивный режим включенные в холодное время года нагнетательные вентиляторы шахтных калориферных установок. Указанные мероприятия позволяют изменить направление движения воздуха в воздухоподающих стволах и в выработках главных направлений (до АД) в требуемую сторону (см. рис. 2).

После закрытия АД за ними образуется зона пониженного давления и возникнет депрессия, действующая встречно направлению движения воздуха, поступающего в выработанное пространство и добычные участки. При этом выработанное пространство будет наполняться воздухом, поступающим со стороны ГВУ, т.е. в главных вентиляционных выработках воздух будет двигаться в требуемом направлении, после чего отключится рециркуляционная установка.

Как только в воздухоподающих стволах и выработках главных направлений будет обеспечен реверс струи, АД начнут открываться, в результате чего возникнет тяга, действующая в требуемом направлении, т.е. в сторону воздухоподающих стволов. Угол открытия рассчитывается заранее и определяется уровнем сигнала с ПЛК.

В этом случае влияние выработанных пространств на процесс проветривания при реверсе ГВУ будет сведено к минимуму, в результате чего в руднике (шахте) воздух в кратчайший срок начнет двигаться в требуемом направлении.

Безопасные условия труда для горнорабочих в случае использования предлагаемого способа, при штатном режиме работы АД и системы автоматизации рециркуляции, будут обеспечены как в нормальном, так и аварийном режимах работы системы проветривания шахты (рудника). Энергосбережение при проветривании будет обеспечиваться не только за счет использования рециркуляции, но и в процессе регулирования режима работы ГВУ с учетом действия общерудничной (общешахтной) естественной тяги.

#### **Работа предлагаемой системы проветривания в случае возникновения отказов оборудования**

Ввиду того что АД в предлагаемой системе автоматизации проветривания в штатном режиме находятся в открытом положении, они не могут оказать какого-либо влияния на процесс воздухораспределения между выработками. Если предположить, что по причине отказа АД закроются, то подобная ситуация не вызовет угрозу для горнорабочих при определении следующего алгоритма работы системы.

При заклинивании АД в закрытом положении воздух будет продолжать двигаться в требуемом направлении до тех пор, пока не будет полностью заполнены пустоты выработанного пространства. Для увеличения продолжительности периода проветривания в подобном режиме ГВУ можно перевести на пониженную производительность (соблюдая условия безопасности по обеспечению рудника свежим воздухом), а рециркуляционную установку отключить. До тех пор, пока датчик расхода воздуха в рециркуляционном контуре не покажет смену направления движения воздуха в сторону воздухоподающих стволов, ГВУ может работать в установленном режиме. Изменение (снижение скорости движения воздуха до 0) направления движения воздуха в рециркуляционном контуре будет свидетельствовать о том, что все запасы воздуха, содержащиеся в выработанном пространстве, были выданы на поверхность, т.е. о ситуации, когда воздух в вентиляционный ствол начинает поступать из воздухоподающих стволов, минуя добычные участки. В этом случае ГВУ и рециркуляционную установку необходимо перевести в реверсивный режим, в результате чего свежий воздух направится в горные выработки.

Наиболее вероятная ситуация, представляющая наибольшую опасность, возникнет, если АД заклинит в закрытом положении во время перевода системы вентиляции в реверсивный режим. В этом случае движение свежего воздуха навстречу горнорабочим будет осуществляться

до заполнения выработанного пространства в течение от 40 мин до 2 часов [22, 23]. За данный промежуток аварийная ситуация (с АДВ и/или взгоранием) может быть полностью устранена.

Однако ввиду того что АДВ в предлагаемом способе используются только для создания аэродинамического сопротивления на участке поступления воздуха из воздухоподающих стволов в выработанное пространство, их конструкция может быть выполнена таким образом, чтобы закрывающиеся части двери не перекрывали полностью горную выработку. В этом случае влияние выработанного пространства на процесс проветривания также будет снижено, но будут полностью обеспечены условия для безопасного ведения горных работ в случае выхода из строя АДВ.

### Заключение

Предложенный способ автоматизации позволит осуществлять проветривание в энерго- и ресурсосберегающем режимах за счет

частичного повторного использования воздуха (рециркуляции) и положительного действия общерудничной (общешахтной) естественной тяги, но при соблюдении условий безопасности ведения горных работ.

Расположение АДВ в выработках главных направлений позволит избежать влияния выработанных пространств на проветривание в момент реверсии струи. Заклинивание АДВ в открытом положении как в штатном, так и в аварийном режимах проветривания практически не окажет влияния на безопасность работы в руднике (шахте).

Единственная угроза – заклинивание АДВ в закрытом положении при осуществлении реверса. Для обеспечения безопасности условий труда при подобной неисправности достаточно обеспечить условия неполного перекрытия АДВ сечения выработки либо создать условия, при которых подобная авария будет устраняться за время заполнения выработанного пространства свежим воздухом (40 мин – 2 часа).

### Библиографический список

1. 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.
2. Мохирев Н.Н. Использование рециркуляции воздуха при проветривании калийных рудников // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – № 9. – С. 47–51.
3. Файнбург Г.З., Фоминых В.И. О расчете проветривания вентиляционных сетей добычного участка в режиме рециркуляции // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1980. – С. 60–64.
4. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Расчет газовой динамики при рециркуляционном проветривании добычного участка // Вентиляция шахт и рудников. – Л., 1978. – Вып. 5. – С. 26–32.
5. Aldred R., Sproston J.H., Pearce R.J. Air-conditioning and recirculation of mine air in North Nottinghamshire // Mining Engineer. – 1984. – Vol. 143, № 273. – P. 601–607.
6. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation // Transaction of the Inst. Of Mining Engineers. – 1933. – Vol. 90. – P. 63–68.
7. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years // The Mining Eng. – 1982. – Vol. 141, № 244. – P. 401–413.
8. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of air at wearmouth colliery British coal corporation // Journal of Mine Ventilation Society South Africa. – 1988. – № 6. – P. 78–87.
9. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of air at Wearmouth Colliery // Mining Engineering. – 1987. – Vol. 146, № 308. – P. 661–671.
10. Vutukuri V.S., Lama R.D. How to maximize the recirculation of used air // Tunnel and Tunneling. – 1988. – № 10. – P. 57–59.
11. Bichall J. British start to recirculate air underground // Coal Age. – 1987. – Vol. 92, № 6. – P. 44–45.
12. Николаев А.В., Файнбург Г.З. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок нефтешахт // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 92–98. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.10
13. Николаев А.В., Алыменко Н.И. Применение системы кондиционирования воздуха с учетом тепловых депрессий, действующих между стволами // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 12–15.
14. Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Киряков А.С. Исследование процессов теплопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 121–129. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.11.12
15. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2012. – 340 с.
16. Левин Л.Ю., Круглов Ю.В. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 10. – С. 39–48.
17. Головатый И.И., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. Шахтная вентиляционная установка с системой автоматического управления для рециркуляционного проветривания калийных рудников // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 78–80.
18. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 2. – С. 104–109.
19. Мохирев Н.Н. Разработка современных методов и средств обеспечения высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями: дис. ... д-ра

техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1994. – 302 с.

20. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Управление проветриванием шахт и рудников на основе математического моделирования вентиляционных процессов // Применение ЭВМ и математических методов в горном деле: тр. 17-го междунар. симп. – М., 1982. – Т. 3. – С. 10–12.

21. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2014. – Сер. 03, вып. 78. – 276 с.

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

23. Постникова М.Ю. Влияние выработанных пространств на аэрогазодинамические процессы при аварийных режимах вентиляции рудников: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2010. – 191 с.

24. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

25. Griffin R. In-mine evaluation of underground fire and smoke detectors. – Morgantown WV: University of West Virginia, 1978. – 18 p.

26. Осипов С.Н., Жадан В.М. Динамика пожара в горизонтальной горной выработке // Уголь Украины. – 1967. – № 9. – С. 15–17.

27. Hardcastle S.G., Kolada R.J., Stokes A.W. Studies into the wider application of controlled recirculation in Mine Ventilation // The mining Engineering (Gr. Brit.). – 1984. – Vol. 143, № 273. – P. 591–598.

28. Impact of using auxiliary fans on coal mine ventilation efficiency and cost / K.G. Wallace, M.J. McPherson, D.J. Brunner, F.N. Kissel // Bur. mines US Dep. Inter. – 1990. – № 9307. – P. 1–8.

29. Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А. Мероприятия, предназначенные для защиты горнорабочих от отравления угарным газом в случае возникновения пожара в конвейерном штреке блока калийного рудника // Рудник будущего. – 2012. – № 2. – С. 67–70.

30. Система автоматизации главной вентиляторной установки: заявка на патент № 2017109327 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Алыменко Д.Н., Файнбург Г.З., Вавулин А. В.; заявл. 20.03.2017.

31. Николаев А.В. Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Перм. нац. исслед. политех. ун-т. – Пермь, 2012. – 20 с.

32. Мохирев Н.Н., Радько В.В., Попов А.С. Вспомогательные вентиляторные установки эжектирующего типа // Технология ведения горных работ и производство машин для горнодобывающих предприятий: сб. тр. – Пермь, 2007. – Вып. 3. – С. 153–159.

33. Алыменко Д.Н. Работа вентиляторной установки комбинированного типа в рудничной вентиляционной сети: дис. ... канд. техн. наук / Горный институт УрО РАН. – Пермь, 1999. – 159 с.

34. Алыменко Н.И., Николаев А.В., Николаев В.А. Использование тепловых депрессий и изолирующих устройств с целью повышения энергоэффективности проветривания блоков калийных рудников // Рудник будущего. – 2012. – № 3(11). – С. 128–131.

## References

1. 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.

2. Mokhirev N.N. Ispol'zovanie retsirkulatsii vozdukhа pri provetrivaniі kaliinykh rudnikov [Use of air recirculation in the ventilation of potash mines]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 1987, no.9, pp.47-51.

3. Fainburg G.Z., Fominykh V.I. O raschete provetrivaniia ventilatsionnykh setei dobychnogo uchastka v rezhime retsirkulatsii [On the calculation of the ventilation of the ventilation networks of the mining section in the mode of recirculation]. *Razrabotka soliannykh mestorozhdenii*, Perm', 1980, pp.60-64.

4. Krasnoshtein A.E., Fainburg G.Z. Raschet gazovoi dinamiki pri retsirkulatsionnom provetrivaniі dobychnogo uchastka [Calculation of gas dynamics during recirculation airing of a mining site]. *Ventiliatsiia shakht i rudnikov*, Leningrad, 1978, iss.5, pp.26-32.

5. Aldred R., Sproston J.H., Pearce R.J. Air-conditioning and recirculation of mine air in North Nottinghamshire. *Mining Engineer*, 1984, vol.143, no.273, pp.601-607.

6. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation. *Transaction of the Inst. Of Mining Engineers*, 1933, vol. 90, pp.63-68.

7. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years. *The Mining Eng*, 1982, vol.141, no.244, pp.401-413.

8. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of air at wearmouth colliery British coal corporation. *Journal of Mine Ventilation Society South Africa*, 1988, no.6, pp.78-87.

9. Robinson R., Harrison T. Controlled recirculation of air at Wearmouth Colliery. *Mining Engineering*, 1987, vol. 146, no.308, pp.661-671.

10. Vutukuri V.S., Lama R.D. How to maximize the recirculation of used air. *Tunnel and Tunneling*, 1988, no.10, pp.57-59.

11. Bichall J. British start to recirculate air underground. *Coal Age*, 1987, vol.92, no.6, pp.44-45.

12. Nikolaev A.V., Fainburg G.Z. On energy and resource-saving of underground oil mine workings. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no.14, pp.92-98. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.10

13. Nikolaev A.V., Alymenko N.I. Primenenie sistemy konditsionirovaniia vozdukhа s uchetom teplovykh depressii, deistvuiushchikh mezhdū stvolami [Application of the air conditioning system taking into account thermal depressions acting between the trunks]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, no.12, pp.12-15.

14. Zaitsev A.V., Kliukin Iu.A., Kiriakov A.S. Research in the process of heat and mass exchange in mine openings using the systems of partial air reuse. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no.11, pp.121-129. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.11.12

15. Kruglov Iu.V. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy postroeniia sistem optimal'nogo upravleniia provetrvaniem podzemnykh rudnikov [Theoretical and technological foundations for constructing optimal control systems for ventilating underground mines]. Doctor's degree dissertation. Perm', 2012, 340 p.

16. Levin L.Iu., Kruglov Iu.V. Issledovanie retsirkulatsionnogo sposoba provetrvaniia kaliinykh rudnikov i ego ekonomicheskaiia effektivnost' [Investigation of the recycling method for the ventilation of potash mines and its economic efficiency]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2008, no.10, pp.39-48.

17. Golovaty I.I., Kruglov Iu.V., Levin L.Iu. Shakhtnaia ventilatornaia ustanovka s sistemoi avtomaticheskogo upravleniia dlia retsirkulatsionnogo provetrvaniia kaliinykh rudnikov [Mine fan installation with automatic control system for recirculation airing of potash mines]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no.8, pp.78-80.

18. Kruglov Iu.V., Levin L.Iu. Osnovy postroeniia optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniia provetrvaniem podzemnykh rudnikov [Basics of constructing optimal automatic control systems for ventilation of underground mines]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2010, iss.2, pp.104-109.

19. Mokhirev N.N. Razrabotka sovremennykh metodov i sredstv obespecheniia vysokoeffektivnogo provetrvaniia rudnikov, obladaushchikh malymi aerodinamicheskimi soprotivleniiami [Development of modern methods and means to ensure highly effective ventilation of mines with low aerodynamic drags]. Doctor's degree dissertation. Perm', 1994, 302 p.

20. Krasnoshtein A.E., Fainburg G.Z. Upravlenie provetrvaniem shakht i rudnikov na osnove matematicheskogo modelirovaniia ventilatsionnykh protsessov [Control of ventilation of mines and mines on the basis of mathematical modeling of ventilation processes]. *Primenenie EVM i matematicheskikh metodov v gornom dele. Trudy 17 mezhdunarodnogo simpoziuma*. Moscow, 1982, vol.3, pp.10-12.

21. Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh [Safety rules for mining and processing of solid minerals]. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti. Moscow, Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniia problem promyshlennoi bezopasnosti, 2014, seria 03, iss.78, 276 p.

22. Mokhirev N.N., Rad'ko V.V. Inzhenernye raschety ventilatsii shakht. Stroitel'stvo. Rekonstruktsiia. Eksploatatsiia [Engineering calculations of mine ventilation. Building. Reconstruction. Exploitation]. Moscow, Nedra-Biznesssentr, 2007, 324 p.

23. Postnikova M.Iu. Vliianie vyrabotannykh prostranstv na aerogazodinamicheskie protsessy pri avariinykh rezhimakh ventilatsii rudnikov [Influence of

the developed spaces on aerogasdynamic processes in emergency modes of mine ventilation]. Ph. D. thesis. Tula, 2010, 191 p.

24. Osipov S.N., Zhadan V.M. Ventilatsiia shakht pri podzemnykh požharakh [Ventilation of mines in underground fires]. Moscow, Nedra, 1973, 152 p.

25. Griffin R. In-mine evaluation of underground fire and smoke detectors. Morgantown WV, University of West Virginia, 1978, 18 p.

26. Osipov S.N., Zhadan V.M. Dinamika požara v gorizontnoi gornoi vyrabotke [Dynamics of fire in horizontal mining]. *Ugol' Ukrainy*, 1967, no.9, pp.15-17.

27. Hardcastle S.G., Kolada R.J., Stokes A.W. Studies into the wider application of controlled recirculation in Mine Ventilation. *The mining Engineering (Gr. Brit.)*, 1984, vol.143, no.273, pp.591-598.

28. Wallace K.G., McPherson M.J., Brunner D.J., Kissel F.N. Impact of using auxiliary fans on coal mine ventilation efficiency and cost. *Bur. mines US Dep. Inter.*, 1990, no.9307, pp.1-8.

29. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Nikolaev V.A. Meropriiatiia, prednaznachennye dlia zashchity gomorabochikh ot otravleniia ugarnym gazom v sluchae vozniknoveniia požara v konveiernom shtreke bloka kaliinogo rudnika [Measures designed to protect miners from carbon monoxide poisoning in the event of a fire in the conveyor drift of a block of potash mine]. *Rudnik budushchego*, 2012, no.2, pp.67-70.

30. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Nikolaev V.A., Alymenko D.N., Fainburg G.Z., Vavulin A.V. Sistema avtomatizatsii glavnoi ventilatornoi ustanovki [The automation system of the main fan installation]: zaiavka na patent no.2017109327.

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

32. Mokhirev N.N., Rad'ko V.V., Popov A.S. Vspomogatel'nye ventilatornye ustanovki ezhektiruiushchego tipa [Auxiliary fan installations of ejection type]. *Tekhnologiia vedeniia gornykh rabot i proizvodstvo mashin dlia gornodobyvaiushchikh predpriatii. Sbornik trudov*. Perm', 2007, iss.3, pp.153-159.

33. Alymenko D.N. Rabota ventilatornoi ustanovki kombinirovannogo tipa v rudnichnoi ventilatsionnoi seti [The operation of a combined-type fan plant in a mine ventilation system]. Ph. D. thesis. Perm', 1999, 159 p.

34. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Ispol'zovanie teplovykh depressii i izoliruiushchikh ustroistv s tsel'iu povysheniia energoeffektivnosti provetrvaniia blokov kaliinykh rudnikov [The use of thermal depressions and insulating devices to improve the energy efficiency of ventilation blocks of potash mines]. *Rudnik budushchego*, 2012, no.3(11), pp.128-131.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Обеспечение безопасности и энергоэффективности при проветривании шахт и рудников, использующих систему рециркуляции воздуха / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, М. Чехлар, Ю. Яночко, Д.Н. Алыменко, В.А. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №4. – С.370–377. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.8

Please cite this article in English as:

Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Chexklar M., Janocko Yu., Alymenko D.N., Nikolaev V.A. Ensuring the safety and energy efficiency of ventilation of shafts and mines that use the air recycling system. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.4, pp.370-377. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.8