

УДК 622.457.2

## ЭЖЕКТИРОВАНИЕ ВОЗВРАТНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОБОЙНОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ В ТУПИК ВОЗДУШНОЙ СТРУИ

Казаков Борис Петрович<sup>1</sup>,  
aero\_kaz@mail.ru

Шалимов Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
shalimovav@mail.ru

Гришин Евгений Леонидович<sup>1</sup>,  
aerogevg@mail.ru

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН,  
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью развития ресурсосберегающих технологий нагнетательного проветривания тупиковых горных выработок, связанных с обеспечением сохранности воздухопроводов во время проведения взрывных работ. Решение проблемы заключается в разработке технических решений, позволяющих убрать конец воздухопровода из зоны поражающего действия разлетающихся осколков горной породы, отодвинув его от груди забоя на безопасное расстояние без нарушения требований правил безопасности.

**Цель:** разработка ресурсосберегающего способа проветривания тупиковых выработок нагнетанием, связанного с использованием кинетической энергии воздушной струи для подсоса возвратного потока воздуха в камеру смешения с ожидаемым эффектом увеличения расстояния проветривания.

**Объекты:** тупиковые выработки.

**Методы:** аналитическое и численное моделирование процессов эжекции воздуха и распространения стеснённой настилающейся воздушной струи, направленной в тупик; сравнительный анализ экспериментальных и модельных данных.

**Результаты.** Проведён анализ экспериментальных данных по проветриванию тупиковых выработок нагнетательным способом с отставанием конца трубопровода от груди забоя. Отмечено, что полученные различными исследователями экспериментальные зависимости для определения дальности вентиляционной струи не позволяют сделать однозначный вывод о допустимом расстоянии отставания ввиду слишком большого разброса значений коэффициента пропорциональности между ним и поперечным размером выработки. Установлено, что причиной разброса является пренебрежение зависимостью дальности струи от её начальной скорости и расхода, которая тем менее ярко выражена, чем менее стеснённой является струя. Рассмотрена возможность увеличения стеснения и расхода струи путём эжекционного подсоса возвратного потока воздуха в установленную перед концом трубопровода камеру смешения. Представлена аналитическая модель работы эжекторной установки с проницаемой перемычкой, по результатам которой сделана оценка увеличения расхода струи за счёт рециркуляции. Несмотря на небольшое значение коэффициента эжекции численное моделирование процесса показало неожиданно большое увеличение дальности проветривания при возрастании начальной скорости струи в реальном диапазоне, и требуемый результат отставания трубопровода в 50 м был достигнут. Показано, что предложенный ресурсосберегающий способ нагнетательного проветривания тупиковых выработок требует проведения предварительной процедуры подбора и оптимизации геометрических размеров трубопровода, камеры смешения и расхода воздуха, т. к. при численном моделировании наблюдается как недостаточная глубина проветривания, так и потеря устойчивости с развалом единого циркуляционного вихря при чрезмерно интенсивном движении воздуха.

### Ключевые слова:

Трубопровод, ударная волна, камера смешения, вентилятор местного проветривания, эжекционный эффект, аэродинамическое сопротивление, неустойчивость, стеснённая настилающаяся струя.

### Введение

Нагнетательный способ проветривания тупиковых выработок имеет наибольшее распространение на горнодобывающих предприятиях, а на газовых шахтах является обязательным и единственным [1]. Его отличительная особенность в сравнении со всасывающим способом состоит в том, что призабойное пространство проветривается струей свежего воздуха, выходящего из трубопровода с большой скоростью, что позволяет размещать его на удалении от груди забоя. В соответствии с требованиями Единых правил безопасности [2] и действующего «Технологического регламента (специальных мероприятий)...» [3] отставание става вентиляционных труб от забоя тупиковой выработки при любом способе её проветривания не должно превышать 10 м. При буровзрывном способе

проходки выработок выполнение этого требования сопряжено со значительными трудностями в связи с невозможностью сохранения целостности и работоспособности конечных участков вентиляционных труб, подвергающихся разрушительному действию ударной волны и разлетающихся кусков взорванной горной массы при производстве взрывов. Негативными последствиями взрыва являются нарушение целостности трубопровода и необходимость замены его концевой части протяженностью до 20–30 м. Восстановление повреждённых вентиляционных рукавов после каждого взрыва приводит к значительному росту трудоёмкости работ и снижению показателей проходки, в том числе и безопасности горных работ в связи с увеличением времени простоя незакреплённых, свежееобнажённых взрывом участков, поскольку

доступ к ним горнорабочих становится возможным только после проветривания забоя.

Из результатов опытных и теоретических исследований [4–10] следует, что отмеченное требование правил безопасности на ограничение расстояния отставания става вентиляционных труб от забоя не всегда является обоснованным и в зависимости от условий может быть ослаблено в сторону увеличения расстояния без нарушения нормального проветривания. Поэтому определение величины этого расстояния в зависимости от конкретных условий проветривания тупиковой выработки даёт возможность получения оптимального решения в смысле достижения компромисса между безопасным и ресурсосберегающим проветриванием [11].

Специалистами ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» неоднократно испытывались различные варианты организации проходки и проветривания тупиковых выработок с целью поиска оптимальных условий, обеспечивающих возможность эффективного проветривания забоев поле взрывных работ без последующего трудоёмкого восстановления разрушаемых взрывом участков става вентиляционных труб. На руднике «Октябрьский» были проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) по проветриванию тупиковых выработок после взрывных работ без использования сжатого воздуха [12], которые проводились в четырех тупиковых выработках, проводимых по богатым, медистым и вкрапленным рудам. Отставание вентиляционных труб в опытных забоях варьировалось от 10 до 28 м по критерию минимально допустимой скорости движения воздуха у груди забоя. Целью проведения ОПИ являлось определение технической возможности проветривания тупиковых горных выработок в процессе их проходки только вентиляторами местного проветривания (ВМП) с соблюдением всех требований промышленной безопасности, предусмотренных регламентирующими документами. К сожалению, ожидаемый положительный эффект снижения разрушающего воздействия взрывов на конечные участки вентиляционных труб получен не был. Фактически разлёты кусков взорванной горной массы составили в среднем 19–30 м, а отдельных кусков – до 50 м. При этом было отмечено, что наибольшие разлёты имели место в выработках, проводимых по медистым рудам, наименьшие – по богатым и вкрапленным рудам. Вкупе с ударной волной это привело к значительным повреждениям вентиляционных труб, т. е. отставание их от забоя в данных условиях оказалось меньше размера зоны поражения осколками породы.

#### **Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования распространения воздушных струй, направленных в тупик**

Экспериментальные исследования воздушных струй, направленных в тупик, были проведены большим количеством исследователей в широком диапазоне параметров стеснения [4–10]. Было установлено, что турбулентные струи, образующиеся в ограниченном пространстве, по основным кинематическим и

динамическим свойствам значительно отличаются от турбулентных струй, распространяющихся в неограниченном пространстве. В процессе захвата струей воздуха из окружающего пространства происходит торможение струи и уменьшение количества ее движения. Анализ физической картины взаимодействия встречных потоков показывает, что на дальность струи основное влияние оказывает характер ее стеснения, а остальные факторы являются менее значимыми [13].

Проведенные измерения по установлению дальности струи на Оленегорском подземном руднике ОАО «ОЛКОН» и на подземном руднике горно-обогатительного комбината «Олений ручей» Северо-Западной Фосфорной Компании показали, что средневзвешенное значение дальности струи составляет для первого рудника  $L=8,45\sqrt{S}$ , для второго –  $L=7,79\sqrt{S}$  м. Поскольку на обоих рудниках имеются отклонения от среднего значения как в большую, так и в меньшую стороны, с учетом коэффициента запаса 1,3 было принято максимальное значение отставания трубопровода от груди забоя

$$L=k\sqrt{S}, \text{ м}, \quad (1)$$

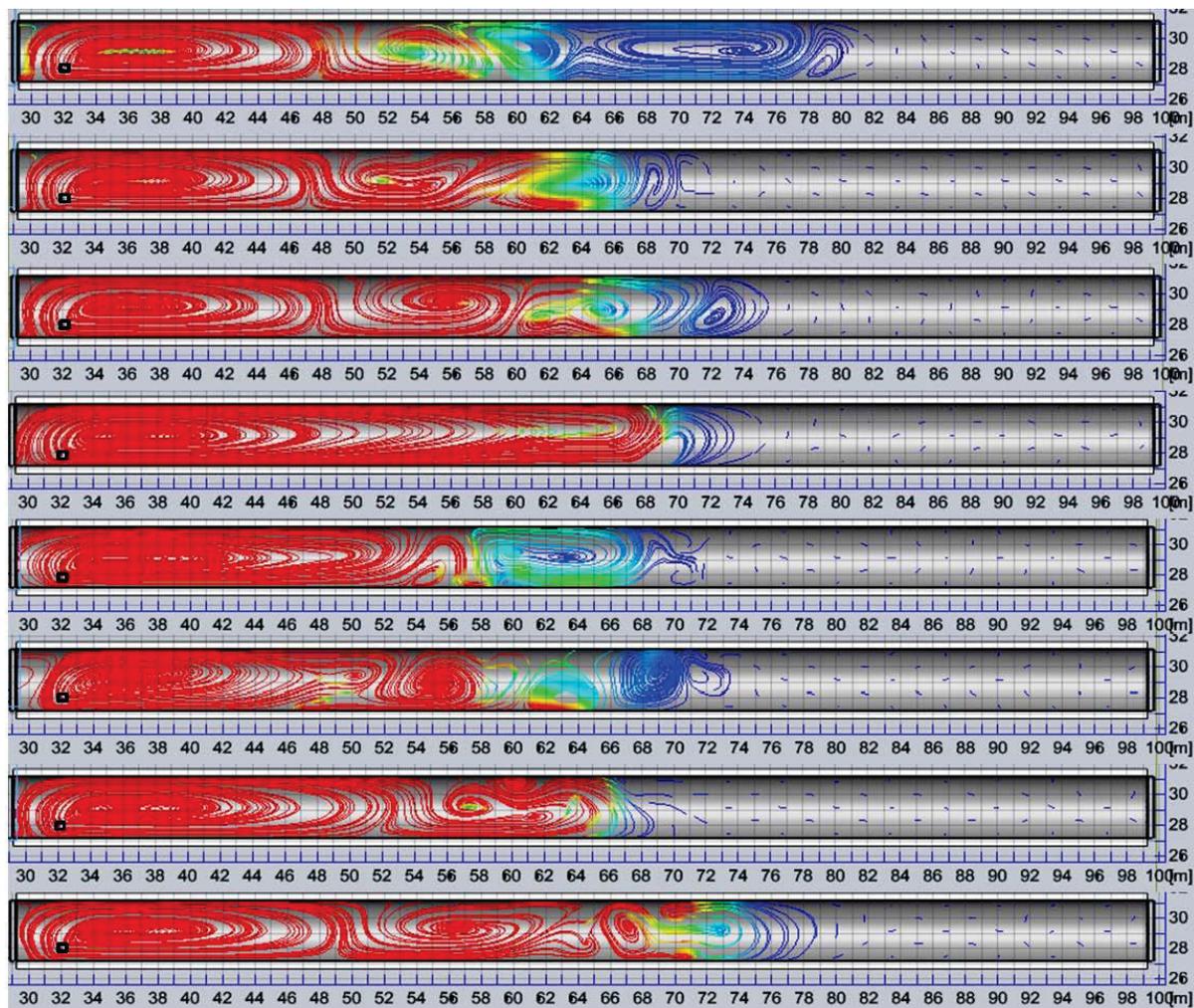
где  $k=6,5$ . Полученный результат не является общепризнанным. В литературе по вентиляции встречаются как другие величины коэффициентов при  $\sqrt{S}$ , так и другие типы зависимостей [14]. Следует учесть также, что и само понятие дальности струи является условным, т. к. распад струи не происходит мгновенно, и расстояние, на котором струю следует считать иссякшей, не является строго определённым.

Горным институтом КНЦ РАН на предприятиях ОАО «Апатит» экспериментальным путем определялась дальность струи воздуха, подаваемого по вентиляционным трубам в забой различных сечений горных выработок [15]. Максимальное значение длины струи определялось по замерам скорости воздуха, превышающей величину 0,25 м/с, выбор которого был обусловлен необходимостью точной фиксации остаточного движения воздуха в направлении забоя, не вызванного инструментальной погрешностью измерений, которая составляет ~0,1 м/с. Соответственно за границу распространения струи принята наиболее удалённая в сторону груди забоя точка, устойчивая скорость струи в которой составляла не менее 0,25 м/с. Экспериментальное определение дальности струи в разных тупиковых выработках по данному критерию показало, что величины коэффициента  $k$  в (1) лежат в широком диапазоне значений от 3 до 9, что не позволяет сделать однозначную оценку допустимого отставания воздухопровода в общем случае с приемлемой точностью. Причиной столь большой разницы в определении дальности струи, очевидно, является слишком упрощённый вид её зависимости только от сечения выработки (1), не учитывающий другие факторы.

Результаты численного моделирования распространения воздушной струи, направленной в тупик, при увеличении скорости истечения воздуха показали

[16], что её дальность увеличивается в значительной степени, чтобы не принимать во внимание зависимость от скорости. В выработке с поперечным размером 4 м, проветриваемой вентилятором ВМЭ-12А (диаметр 1,2 м), при увеличении скорости струи с 5 до 80 м/с её дальность увеличилась с 12 до 56 м, что, в соответствии с экспериментальными данными по определению величины поражающего

действия разлетающихся при взрыве осколков, решает проблему сохранности трубопровода. Однако следует отметить, что в соответствии с техническими характеристиками вентилятора ВМЭ-12А скорость выхода воздушной струи из него без её искусственного сужения не превышает 30 м/с, что соответствует дальности  $\sim 30$  м, а этого недостаточно для решения отмеченной проблемы.



**Рис. 1.** Результаты численного моделирования распространения стеснённой настилающей струи в тупик при разных значениях начальной скорости движения воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м/с по возрастанию сверху вниз. Красным цветом отмечены траектории движения воздуха со скоростью не меньшей 0,25 м/с. Поперечный размер выработки – 4 м, диаметр струи из воздухопровода – 0,5 м

**Fig. 1.** Results of numerical simulation of the propagation of a constrained laying jet into a dead end at different values of the initial velocity of air movement: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m/s ascending from top to bottom. The trajectories of air movement at a speed of at least 0,25 m/s are marked in red. The transverse size of the output is 4 m, the diameter of the jet from the air line is 0,5 m

Было проведено численное моделирование в программном комплексе SolidWorks, которое показало, что использование воздухопровода меньшего диаметра или конфузора, увеличивающего скорость с уменьшением расхода, только ухудшает проветривание. Оказалось, что уменьшение сечения струи сокращает дальность её распространения сильнее, чем увеличение скорости истечения потока. При установке конфузора с выходным диаметром 0,5 м и уменьшении степени стеснения струи зависимость её даль-

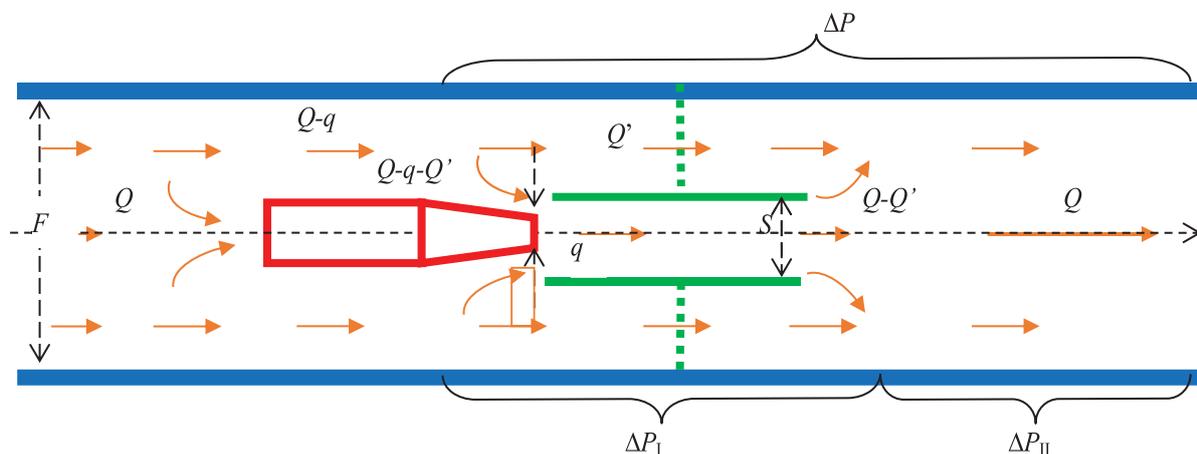
ности от начальной скорости практически исчезает (рис. 1) со значением  $k=6,5-9$ . В семи из восьми вариантов скоростей наблюдается распад циркуляции воздуха на два и более частично локализованных вихря, и только при начальной скорости воздушной струи  $\sim 40$  м/с образуется целостный вихрь протяжённостью  $\sim 37$  м. Этот результат подтверждает сделанное предположение о том, что пренебрежение зависимостью дальности воздушной струи от начальной скорости в общем случае применительно к

произвольным условиям проветривания тупиковых выработок корректным не является. При увеличении стеснения струи, как было установлено в [16], такая зависимость появляется, что наводит на мысль о целесообразности использования камеры смешения для подсоса возвратного потока воздуха, инициирующей появление вторичной эжекционной струи большего сечения и с большим расходом.

**Аналитическая модель работы эжекторной установки с камерой смешения без перемычки**

Из практики использования ВМП для улучшения вентиляции горных выработок следует, что при малых аэродинамических сопротивлениях участков проветривания выгоднее применять вентилятор-эжектор, преобразующий энергию вентиляционной струи в эжекционный напор, в то время как у обычного установленного в перемычке вентилятора энергия струи расходуется без пользы. В зависимости от величины аэродинамического сопротивления участка проветривания эжекционный напор может быть увеличен камерой смешения, ограничивающей сечение раскрытия воздушной струи [17]. Камера смешения, как правило, устанавливается в перемычке, чтобы исключить утечки воздуха. Однако при проветривании выработок большого сечения [18], в которых сооружение перемычки проблематично или нецелесообразно, установка камеры смешения перед вентилятором-эжектором также может иметь положительное действие и даже вызывать эффект вторичной эжекции. На первый взгляд может показаться, что эжекционный эффект никакого полезного действия для проветривания тупиковой выработки иметь не может.

Тем не менее такие примеры есть. В работе [19] в качестве одного из вариантов беструбного проветривания тупиковых выработок рассмотрена возможность и дана количественная оценка эффекта от установки в выработке продольной перегородки, за счёт которой инициируется эжекционный подсос воздуха из примыкающей сквозной выработки. Для нагнетательного способа проветривания, если учесть установленный факт зависимости дальности воздушной струи от скорости её истечения при фиксированном сечении, ограничение площади её раскрытия установкой перед ней камеры смешения без перемычки должно увеличить расход воздуха за счёт подсоса возвратного потока. Полезное действие эффекта в данном случае не очевидно, т. к. расход увеличивается на фоне увеличения сечения струи и падения её скорости в камере смешения. Однако с учётом малой величины аэродинамического сопротивления выхода потока из камеры и его разворота эффект может быть положительным по причине ожидаемо высокого значения коэффициента эжекции (отношение исходящего из камеры смешения расхода воздуха к дебиту струи). В представленной ниже математической модели эжекции воздуха в камере смешения эти сопротивления включены в сопротивление проницаемой перемычки  $r$ , в которой установлена камера. При этом для совместности с моделью [17] и возможности использования полученных в ней зависимостей рассматривается более общий вариант конечного сопротивления проветриваемой выработки  $R$ . Затем, как частный случай, применительно к проветриванию тупиковой выработки  $R$  полагается равным бесконечности, а  $r$  применительно к отсутствию перемычки – сопротивлению выхода потока из камеры смешения.



**Рис. 2.** Схема распределения воздушных потоков в горной выработке при эжектировании воздуха в камеру смешения, установленную в воздухопроницаемой перемычке

**Fig. 2.** Scheme of distribution of air flows in the mining during air ejection into the mixing chamber installed in an air-permeable jumper

Общий поток воздуха  $Q$  по выработке вблизи всаса вентилятора разделяется на два потока:  $q$  и  $Q-q$  (рис. 2). Для непроницаемой перемычки  $Q-q$  является эжектируемым потоком для эжектирующего потока  $q$ . Если перемычка камеры смешения проницаема, то эжектируемый поток может быть как меньше, так и

больше  $Q-q$ . Пусть  $Q'$  – расход воздуха через перемычку, причём для единообразия за положительное направление движения воздуха выбрано направление струи вентилятора, т. е. эжектируемый поток в данном случае есть  $Q-q-Q'$ . Знак  $Q'$ , вообще говоря, не очевиден, но применительно к проветриванию тупи-

ковой выработки можно заключить однозначно, что  $Q' < 0$ . Ситуация  $Q' > 0$  означает возможность возникновения вторичной эжекции, которая может иметь место лишь в условиях сквозного проветривания. Таким образом, по рисунку эжекционные напоры  $\Delta P_{II} = 0$  и  $\Delta P = \Delta P_1$ .

При непроницаемой перемычке камеры смешения для определения напора эжекторной установки может быть использована зависимость  $\Delta P = Y(Q)$ , полученная в [17]:

$$\Delta P = \frac{Q^2}{\rho} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{F} \right) \times \begin{cases} 1/F, Q \geq 0 \\ 1/S, Q < 0 \end{cases} - \frac{(Q-q)^2}{\rho} \left( \frac{1}{S-f} - \frac{1}{F-f} \right) \times \begin{cases} 1/(S-f), (Q-q) \geq 0 \\ 1/(F-f), (Q-q) < 0 \end{cases} + \frac{1}{\rho S} \left[ \frac{(Q-q)^2}{S-f} + \frac{q^2}{f} - \frac{Q^2}{S} \right], \quad (2)$$

где  $F$  – сечение выработки;  $S$  – сечение камеры смешения;  $f$  – сечение струи;  $\rho$  – плотность воздуха. Используемые единицы измерения физических величин: массовые расходы – кг/с, сечения – м<sup>2</sup>, давления – Па, плотность – кг/м<sup>3</sup>, сопротивление – Па/(кг/с)<sup>2</sup>.

В случае проницаемой перемычки расход воздуха по выработке –  $Q$ , а через камеру смешения –  $Q-Q'$ . Поскольку возникновение эжекционного напора происходит внутри камеры смешения, то и определяющим эжекцию расходом является  $Q-Q'$ , т. е.  $\Delta P = Y(Q-Q')$ . Сопротивление перемычки камеры смешения  $r$  можно рассматривать как сопротивление, параллельное сопротивлению проветриваемого участка  $R$ , на который работает эжекторная установка, т. е.  $\Delta P$  является причиной возникновения движения воздуха  $Q'$  через перемычку  $r$ , а, значит,  $|Q'| = \sqrt{\frac{\Delta P}{r}}$ . Относительно

знаков следует сказать, что  $Q' > 0$  при  $\Delta P < 0$ , и наоборот, что  $Q' < 0$  при  $\Delta P > 0$ . Таким образом, получается уравнение для определения эжекционного напора  $\Delta P$  как функции общего расхода воздуха по выработке  $Q$ :

$$\Delta P = Y \left( Q + \sqrt{\frac{\Delta P}{r}} \text{sign}(\Delta P) \right), \quad (3)$$

где  $Y$  – функция, описанная уравнением (2) ( $\Delta P = Y(Q)$ );  $\text{sign}(\Delta P)$  – знак  $\Delta P$ . Уравнение (3) является нелинейным относительно  $\Delta P$  и должно решаться численно. Очевидно, что (2) является частным случаем (3) при  $r \rightarrow \infty$ , т. е. при герметичной перемычке.

Случай  $r=0$  также не лишён смысла, поскольку на практике иногда используется камера смешения без перемычки. Её отсутствие не означает, что сопротивление рециркуляции воздуха вокруг камеры смешения равно нулю, т. к. имеют место потери энергии на поворот потока и на его сужение и расширение. На практике камера смешения значительно меньше выработки по сечению ( $S \ll F$ ), поэтому при отсутствии перемычки основным аэродинамическим сопротив-

лением замыкания потока является его сужение и расширение при входе и выходе из камеры смешения. Сечение потока на входе и выходе из камеры смешения –  $S$  (предположительно  $f \ll S$ ), а при прохождении между камерой смешения и стенками выработки –  $F-S$ . Предполагая сопротивление сужения равным сопротивлению аналогичного расширения и используя для его определения теорему Борда [20], можно оценить общее сопротивление разворота  $r'$  с учётом сужения–расширения потока воздуха при её прохождении:

$$r' = r + \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{F-S} - \frac{1}{S} \right)^2. \quad (4)$$

В таблице представлены результаты расчёта скорости движения воздуха  $v_Q$  (м/с) на выходе из камеры смешения эжекторной установки диаметром 1,2 м с вентилятором ВМЭ-12А с конфузуром диаметром 0,5 м в зависимости от скорости  $v_q$  (м/с) исходящей из него струи воздуха ( $v'_Q$  (м/с) – по результатам численного моделирования с диапазоном изменения скорости воздуха по сечению потока на выходе из камеры смешения). Как следует из таблицы, величина коэффициента эжекции оказывается невелика  $\sim 1,8$ , и на фоне увеличения расхода скорость движения воздуха на выходе из камеры смешения уменьшается более чем в 3 раза по сравнению с начальной. Исходя из того, как было установлено в [16], что необходимая дальность распространения воздушной струи в 50 м достигалась лишь при скорости воздушной струи из трубопровода того же диаметра (1,2 м) в 80 м/с, полезное действие эжекционного эффекта в данном случае представляется сомнительным.

**Таблица.** Значения скоростей движения воздуха на выходе из камеры смешения без перемычки ( $r=0$ ) в зависимости от скорости эжектирующей струи  $v_q$ , полученные по результатам аналитического  $v_Q$  (2)–(4) и численного моделирования  $v'_Q$ .

**Table.** Values of air velocity at the outlet of the mixing chamber without jumper ( $r=0$ ), depending on the velocity of the ejecting jet  $v_q$ , obtained from the results of analytical  $v_Q$  (2)–(4) and numerical simulation  $v'_Q$ .

$v_q$ (м/с) (m/s)	10	20	30	40	50	60	70	80
$v_Q$ (м/с) (m/s)	3,2	6,4	9,6	12,8	15,9	19,0	22,1	25,2
$v'_Q$ (м/с) (m/s)	2–8	4–13	7–18	9–23	11–28	14–34	16–39	18–45

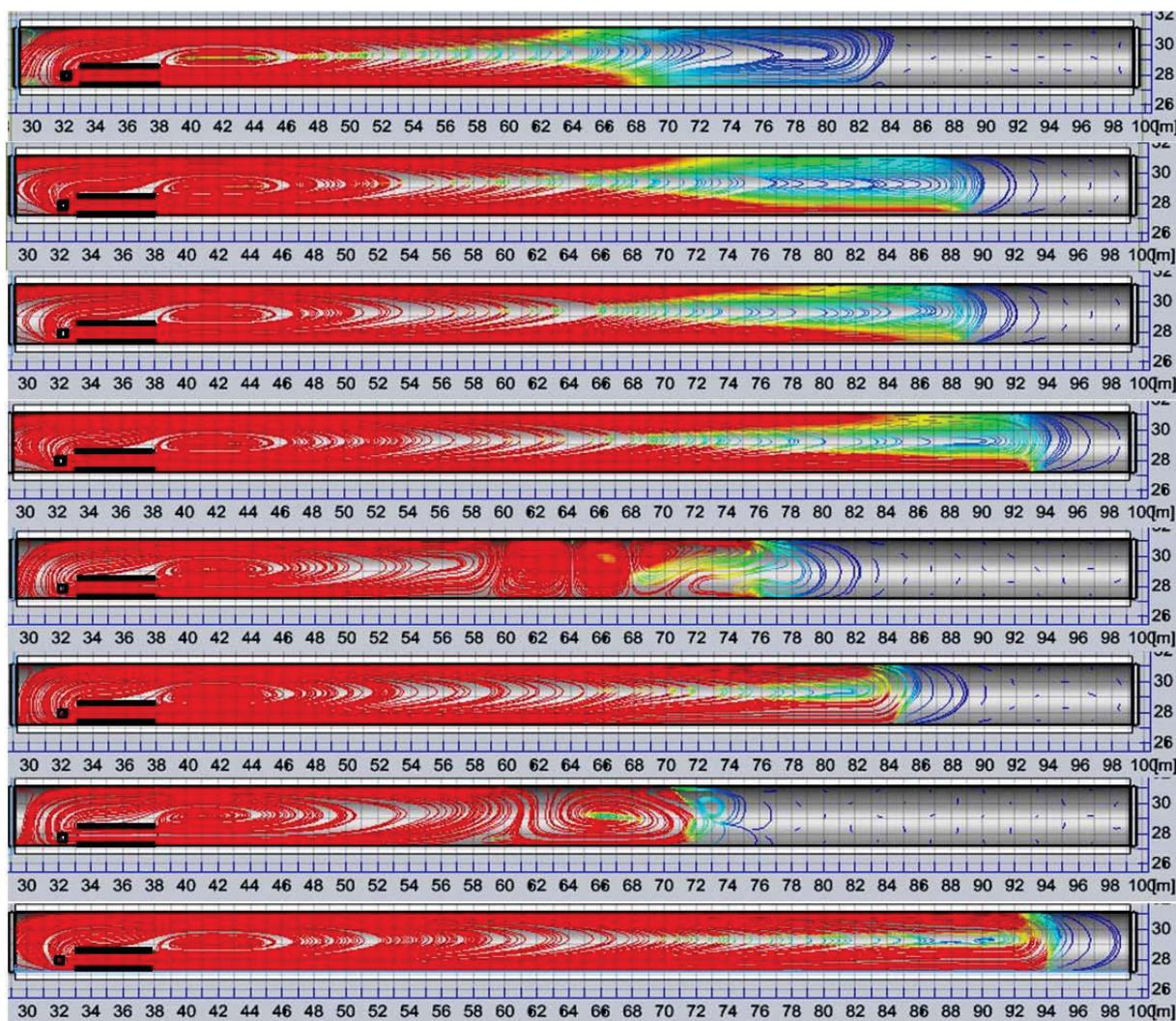
Однако, как показано по результатам численного моделирования (рис. 3), динамика распространения воздушной струи из трубопровода и камеры смешения того же диаметра сильно отличается в пользу второго варианта.

#### Численное моделирование увеличения дальности струи за счёт эжекции

Численное моделирование дальности струи с эжекционным раскрытием её в камере смешения было проведено в программном комплексе Solidworks.

Положительный эффект ожидался от установки камеры смешения диаметром 1,2 м перед конфузуром воздухопровода диаметром 0,5 м в виде устойчивого возрастания дальности распространения струи с ростом её начальной скорости и выходом дальнобойности за пределы зоны поражения осколками породы при взрыве (~50 м) при реальных значениях начальной скорости. Представленные выше результаты численного моделирования показали (рис. 1), что дальнобойность струи при её поперечном размере 0,5 м от её начальной скорости зависит слабо без явно выра-

женной тенденции к возрастанию, а при поперечном размере 1,2 м [16] требуемый результат достигался лишь при «запредельном» значении скорости струи в 80 м/с (расход 96 м<sup>3</sup>/с), более чем в 2 раза превышающем технические возможности вентилятора ВМЭ-12А. С добавлением камеры смешения численное моделирование дало неожиданный результат – расстояние проветривания с увеличением дебита вентилятора ожидаемо возрастало, но значительно сильнее, чем при проветривании воздушной струей непосредственно из трубопровода такого же сечения (рис. 3).



**Рис. 3.** Результаты численного моделирования распространения стеснённой настилающейся струи в тупик с эжектированием возвратного потока воздуха в камеру смешения при разных значениях начальных скоростей движения воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м/с по возрастанию сверху вниз. Красным цветом отмечены траектории движения воздуха со скоростью не меньшей 0,25 м/с. Поперечный размер выработки – 4 м, диаметр камеры смешения – 1,2 м, диаметр конфузора трубопровода – 0,5 м

**Fig. 3.** Results of numerical simulation of a constrained laying jet propagation into a dead end with ejection of the return air flow into the mixing chamber at different values of the initial air velocities: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 m/s ascending from top to bottom. The trajectories of air movement at a speed of at least 0,25 m/s are marked in red. The transverse size of the work out is 4 m, the diameter of the mixing chamber is 1,2 m, the diameter of the confuser of the pipeline is 0,5 m

Требуемый результат в 50 м был достигнут уже при дебите вентилятора 8 м<sup>3</sup>/с (40 м/с), при этом скорость выхода воздуха из камеры смешения составляла всего лишь ~13 м/с. Причиной возникновения подоб-

ного неожиданно сильного положительного эффекта от использования камеры смешения является конфигурация течения на границе встречных потоков вблизи выходного сечения камеры смешения. При отсут-

ствии камеры в месте выхода воздушной струи из воздухопровода происходит наиболее сильная потеря её кинетической энергии в результате столкновения со встречным потоком. Во втором случае, как следует из рисунка, в месте выхода образуется пограничный «буферный» вихрь, подобно шарниру, сглаживающий взаимодействие встречных потоков и позволяющий без потерь воздушной струе из камеры пройти наиболее энергозатратный участок. Причинами образования «полезного» вихря, очевидно, являются сильная неравномерность скорости воздуха по сечению струи, как отмечено в таблице, её несимметричность со смещением в сторону настиления, а также эжекционный подсос воздуха в камеру смешения, также оказывающий благоприятное воздействие на эжективное возвратного потока с минимальными потерями энергии от его столкновения с исходящей струей. Следует отметить также, что при дальнейшем увеличении скорости струи до 50 м/с в результате возникновения неустойчивости на границе встречных потоков расстояние проветривания уменьшается с распадом единой циркуляции воздуха на несколько вихрей, затем при 60 м/с целостность циркуляции восстанавливается, при 70 м/с – опять распад, при 80 м/с расстояние проветривания достигает того же уровня, который наблюдается при 40 м/с. Подобные колебания зависимости дальности воздушной струи от её скорости свидетельствуют о том, что свыше 40 м/с проветривание является ненадёжным ввиду возникновения неустойчивости единого циркуляционного вихря с образованием застойной зоны движения воздуха вблизи груди забоя [21]. Таким образом, максимальный положительный эффект достигается при оптимальном значении скорости струи, меньше которого дальность не достаточна, а при большем значении проветривание выработки оказывается неустойчивым.

#### Заключение

По результатам анализа опытных данных и численного моделирования проветривания тупиковых выработок нагнетательным способом с отнесением

конца воздухопровода от груди забоя подтверждён сделанный ранее вывод о том, что дальность направленной в тупик струи воздуха зависит не только от степени её стеснения, но и от начальной скорости. Установлено, что увеличение скорости струи за счёт уменьшения её сечения положительного эффекта не даёт, и глубина проветривания тупиковой выработки больше не становится. Численный анализ возможности использования камеры смешения для эжективного возвратного потока воздуха показал, что, несмотря на незначительное увеличение расхода, менее чем в 2 раза, структура движения встречных потоков воздуха на выходе из камеры смешения изменилась в лучшую сторону с образованием демпфирующего вихря на границе раздела потоков. Необходимое значение дальности струи в 50 м из воздухопровода диаметром 0,5 м и камерой смешения диаметром 1,2 м достигается по результатам моделирования при дебите в 8 м<sup>3</sup>/с, что соответствует техническим характеристикам шахтных ВМП с учётом аэродинамического сопротивления воздухопровода. Увеличение расхода струи свыше указанного значения имеет негативные последствия из-за неустойчивости циркуляционного вихря, распада его на два или более фрагментов и, как следствие, приводит к уменьшению расстояния проветривания.

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно заключить, что использование эффекта эжективного возвратного потока воздуха при проветривании тупиковых выработок решает проблему сохранности воздухопровода его отнесением от груди забоя на безопасное расстояние. Подбор оптимальных значений расхода воздуха, сечений струи и камеры смешения должен производиться численным моделированием для конкретных условий, т. к. проветривание может быть недостаточным и неустойчивым, и выяснить это аналитическим путём не представляется возможным.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596021 р\_НОЦ\_Пермский край.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes / A. Isaevich, M. Semin, L. Levin, A. Ivantsov, T. Lyubimova // Sustainability. – 2020. – V. 14. – № 5. – статья № 3030.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утв. приказом Ростехнадзора № 505 от 08.12.2020 г., рег. № 61651 Минюста от 21.12.2020 г., вступили в силу с 01.01.2021 г.
3. Технологический регламент по организации проветривания рудников ОАО «Уралкалий». – Пермь: Березники, 2005. – 136 с.
4. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels / M. García-Díaz, C. Sierra, C. Miguel-González, B. Pereiras // Energies. – 2019. – № 12. – P. 1–5.
5. Effect of heading face ventilation arrangement on regulation of dust distribution / Z. Zhou, P. Hu, Z. Han, J. Chen // Journal of Central South University. Science and Technology. – 2018. – V. 49. – № 9. – P. 2264–2271.
6. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 89. – P. 68–77.
7. Roghanch P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2017. – V. 8. – № 4. – P. 280–293.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // Journal of Energy in Southern Africa. – 2018. – № 29 (3). – P. 22–32.
9. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15–23.
10. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Известия Вузов/Горный журнал. – 1978. – № 11. – С. 47–50.

11. Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 79–84.
12. Акт ОПИ по проветриванию тупиковых выработок после взрывных работ без использования сжатого воздуха (только вентиляторами местного проветривания) на руднике «Октябрьский» № ЗФ-95/29 – акт от 14.09.2009.
13. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel / M. Branny, M. Jaszczur, W. Wodziak, J. Szmyd // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 745. – Iss. 3. – P. 1–8.
14. Обоснование безопасности опасного производственного объекта в части проветривания тупиковых горных выработок длиной более 10 метров на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». – СПб: ООО «Институт Гипроникель», 2015. – 250 с.
15. Методика расчета количества воздуха и организации проветривания подземных рудников ОАО «Апатит». – Апатиты: Горный институт КНЦ РАН, 2008. – 42 с.
16. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, О.С. Паршаков, А.В. Богомятков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112–118.
17. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Анализ существующих методов расчёта эффективности работы эжекторных установок в рудниках // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2012. – № 1. – С. 40–46.
18. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения / С.В. Мальцев, Б.П. Казаков, А.Г. Исаевич, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46–57.
19. Павлов С.А. Проветривание призабойного пространства протяженной тупиковой выработки за счет эжекторного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 260–266.
20. Chanson H. Hydraulics of open channel flow: an introduction. 2<sup>nd</sup> ed. – London: Butterworth-Heinemann, 2004. – 650 p.
21. Zhang X., Zhang Y., Tien J.C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine // Proceedings of the 2011 Coal Operators' Conference. Mining Engineering. – Wollongong: University of Wollongong, 18–20 February 2019. – P. 224–230.

Поступила 05.08.2022 г.

#### Информация об авторах

**Казаков Б.П.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт УрО РАН.

**Шалимов А.В.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН.

**Гришин Е.Л.**, кандидат технических наук, зав. сектором, Горный институт УрО РАН.

UDC 622.457.2

## EJECTING THE RETURN AIR FLOW ON INCREASING THE RANGE OF THE AIR JET DIRECTED INTO THE FACE OF THE DEAD-END DRIFT

**Boris P. Kazakov<sup>1</sup>,**  
aero\_kaz@mail.ru

**Andrey V. Shalimov<sup>1</sup>,**  
shalimovav@mail.ru

**Evgeny L. Grishin<sup>1</sup>,**  
aeroevg@mail.ru

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop resource-saving technologies for forced ventilation of dead-end drifts related to ensuring the safety of air ducts during blasting. The solution to the problem lies in the development of technical solutions that make it possible to remove the end of the air duct from the zone of damaging effects of flying fragments of rock, moving it away from the dead-end face to a safe distance without violating the safety rules.

**Purpose:** to develop a resource-saving method of dead-end drift ventilation, which provides the increase of the ventilation range by means of the kinetic energy of the air jet flowing from the booster fan with a mixing chamber.

**Objects:** dead-end drifts.

**Methods:** analytical and numerical modeling of the processes of air ejection and propagation of a constrained overlaying air jet directed to a dead end; comparative analysis of experimental data and simulation results.

**Results.** The analysis of experimental data on the ventilation of dead-end drift by the ejection method with the lag of the end of the pipeline from the dead-end face was carried out. It is noted that the experimental dependencies obtained by various researchers for determining the range of the ventilation jet do not allow us to make an unambiguous conclusion about the permissible lagging distance due to too large spread in the values of the proportionality coefficient between it and the transverse dimension of the drifts. It was established that the reason for the scatter is the neglect of the dependence of the jet range on its initial velocity and flow rate, which is the less pronounced, the less constrained the jet is. The possibility of increasing the constraint and flow rate of the jet by ejection suction of the return air flow into the mixing chamber installed before the end of the pipeline is considered. The paper introduces the analytical model of the operation of an ejector installation with a permeable bulkhead, based on the results of which an increase in the jet flow rate due to recirculation was estimated. Despite the small value of the ejection coefficient, the numerical simulation of the process showed an unexpectedly strong increase in the ventilation range with an increase in the initial jet velocity in the real range, and the required pipeline lag result of 50 meters was achieved. It is shown that the proposed resource-saving method of forced ventilation of dead-end drifts requires a preliminary procedure for selecting and optimizing the geometric dimensions of the pipeline, mixing chamber and air flow, because in numerical simulation, both insufficient ventilation depth and loss of stability with the collapse of a single circulation vortex were observed during excessively intense air movement.

### Key words:

Pipeline, shock wave, mixing chamber, auxiliary fan, ejection effect, aerodynamic drag, instability, constrained spreading jet.

The research was financially supported by the RFBR and Perm region within the scientific project no. 20-45-596021 p\_НОЦ\_Пермский край.

### REFERENCES

1. Isaevich A., Semin M., Levin L., Ivantsov A., Lyubimova T. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*, 2020, vol. 14, no. 5, article no. 3030.
2. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornyykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh», utverzhden prikazom Rostekhnadzora № 505 ot 08.12.2020 g., reg. № 61651 Minyusta ot 21.12.2020 g., vstupili v silu s 01.01.2021 g.* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «Safety Rules for mining and processing of solid minerals», approved by Rostekhnadzor Order No. 505 dated 08.12.2020, reg. No. 61651 of the Ministry of Justice dated 21.12.2020, entered into force on 01.01.2021].
3. *Tekhnologicheskiy reglament po organizatsii provetrvaniya rudnikov OAO «Uralkaliy»* [Technological regulations on the organization of ventilation of mines of JSC Uralkali]. Perm, Berezniki, 2005. 136 p.
4. Garcia-Diaz M., Sierra C., Miguel-González C., Pereiras B. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 1–5.
5. Zhou Z., Hu P., Han Z., Chen J. Effect of heading face ventilation arrangement on regulation of dust distribution. *Journal of Central South University. Science and Technology*, 2018, vol. 49, no. 9, pp. 2264–2271.
6. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 89, pp. 68–77.
7. Roghanch P., Kocsis K. C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 280–293.
8. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2018, no. 29 (3), pp. 22–32.
9. Kolesov E.V., Kazakov B.P. Efficiency of ventilation of dead-end development headings after blasting operations. *Bulletin of the*

- Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 15–23. In Rus.
10. Mostepanov Yu.B. Issledovanie dalnoboynosti stesnennoy strui, deystvuyushchey v zaboe tupikovoy vyrabotki [Investigation of the range of a constrained jet acting in the face of a dead-end mine]. *Izvestia Vuzov. Mining Journal*, 1978, no. 11, pp. 47–50.
  11. Kozyrev S.A., Amosov P.V. Obosnovanie minimalnogo rasstoyaniya ot zaboya provodimoy vyrabotki do kontsa ventilyatsionnykh trub [Justification of the minimum distance from the bottom of the excavation to the end of the ventilation pipes]. *Labor safety in industry*, 2012, no. 10, pp. 79–84.
  12. *Akt OPI po provetrivaniyu tupikovykh vyrabotok posle vzryvnykh rabot bez ispolzovaniya szhatogo vozdukha (tolko ventilyatorami mestnogo provetrivaniya) na rudnike «Oktyabrskiy» № ZF-95/29 - akt ot 14.09.2009* [The act of the OPI on the ventilation of dead-end workings after blasting without the use of compressed air (only with local ventilation fans) at the Oktyabrsky mine no. 3Ф-95/29 – act dated 14.09.2009].
  13. Branny M., Jaszczur M., Wodziak W., Szmyd J. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel. *Journal of Physics: Conference Series* 745, 2016, vol. 745, Iss. 3, pp. 1–8.
  14. *Obosnovanie bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo obyektu v chasti provetrivaniya tupikovykh gornykh vyrabotok dlinoy bolee 10 metrov na rudnikakh ZF OAO «GMK «Norilskiy nikel»»* [Justification of the safety of a hazardous production facility in terms of ventilation of dead-end mine workings with a length of more than 10 meters at the mines of the Polar Branch of OJSC MMC Norilsk Nickel]. St. Petersburg, Gipronickel Institute LLC Publ., 2015. 250 p.
  15. *Metodika rascheta kolichestva vozdukha i organizatsii provetrivaniya podzemnykh rudnikov OAO «Apatit»* [Methodology for calculating the amount of air and organizing ventilation of underground mines of JSC Apatit]. Apatity, Mining Institute KSC RAS Publ., 2008. 42 p.
  16. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Parshakov O.S., Bogomyagkov A.V. Improving the ventilation of a dead end by increasing the initial air velocity in a ventilation jet. *Journal of Mining Science*, 2022, no. 1, pp. 112–118. In Rus.
  17. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Analiz sushchestvuyushchikh metodov rascheta effektivnosti raboty ezhektornykh ustanovok v rudnikakh [Analysis of existing methods for calculating the efficiency of ejector installations in mines]. *News of the Tula State University. Earth Sciences*, 2012, no. 1, pp. 40–46.
  18. Maltsev S.V., Kazakov B.P., Isaevich A.G., Semin M.A. Air exchange dynamics in the system of large cross-section blind roadways. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 2, pp. 46–57. In Rus.
  19. Pavlov S.A. Provetrivanie prizaboynogo prostranstva protyazhennoy tupikovoy vyrabotki za schet ezhektionnogo effekta, voznikayushchego pri ustanovke prodolnoy peregorodki [Ventilation of the bottomhole space of an extended dead-end working due to the ejection effect that occurs during the installation of a longitudinal partition]. *Fundamental and applied issues of mining sciences*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 260–266.
  20. Chanson H. *Hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Butterworth–Heinemann, 2004. 650 p.
  21. Zhang X., Zhang Y., Tien J. C. The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine. *Proceedings of the 2011 Coal Operators' Conference, Mining Engineering*. Wollongong, University of Wollongong, 18–20 February 2019. pp. 224–230.

Received: 5 August 2022.

#### Information about the authors

**Boris P. Kazakov**, Dr. Sc., chief researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Andrey V. Shalimov**, Dr. Sc., leading researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Evgeny L. Grishin**, Cand. Sc., head of the sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.