



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-147>

УДК 622.4



Экспериментальные исследования проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом при различном отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя

А. А. Каменских , Г. З. Файнбург , М. А. Семин , А. В. Таций

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

seminma@inbox.ru

Аннотация

Исследование структуры вентиляционных потоков в призабойной части тупиковой выработки является важным элементом при целенаправленном управлении ее проветриванием и обеспечении безопасности ведения подземных горных работ. Ранее проведенные исследования показывают, что, несмотря на общее понимание протекающих в тупиковой выработке процессов возникновения основного вихря и застойных зон, полученные результаты носят фрагментарный характер и без дополнительных исследований практически не поддаются единому концептуальному обобщению.

В статье приведены результаты детального натурного эксперимента по исследованию процессов нагнетательного проветривания тупиковой выработки большого сечения ($29,2 \text{ м}^2$) с пятью различными вариантами отставания конца нагнетательного вентиляционного трубопровода от груди забоя: 10, 15, 17, 19 и 21 м. Для каждого варианта в соответствии с разработанной методикой эксперимента производили замеры скорости турбулентного вихревого воздушного потока в 25 различных характерных точках (сетка 5×5) в каждом сечении тупиковой горной выработки, которые выбирали через каждый метр от груди забоя до конца вентиляционного става, а также дополнительно еще через 1 м и еще через 10 м от конца вентиляционного става к устью выработки.

Исследования проводили в стандартной тупиковой очистной выработке, проходимой буровзрывным способом, на золотосеребряном руднике «Купол», расположенном в Чукотском автономном округе.

Расход подаваемого в выработку свежего воздуха во всех случаях сохраняли постоянным и равным типичному для рудника расходу $17,4 \text{ м}^3/\text{с}$, определяемому расчетным значением по фактору проветривания выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания погрузочно-доставочных машин. При площади сечения конца трубопровода $0,8 \text{ м}^2$ это дает среднюю скорость поступающей струи в $21,75 \text{ м/с}$. Данные натурного эксперимента дополняли результатами трехмерного численного моделирования в вычислительном пакете ANSYS Fluent. Исследовали стационарное движение воздуха в тупиковой выработке в режиме развитой турбулентности. Сравнительный анализ полученных результатов натурного и численного экспериментов убедительно показал, что во всех исследуемых случаях отставания (не более 21 м) вентиляционного трубопровода от груди забоя вентиляционная струя, выходящая из вентиляционного трубопровода, достигает груди забоя, а затем разворачивается вдоль него с различной интенсивностью и формирует обратное движение воздушного потока из тупика.

Полученные результаты позволили получить линейное уравнение связи между максимальной относительной (к начальной скорости струи) скоростью на расстоянии 1 м от груди забоя и основного геометрического фактора зоны проветривания – отношения длины отставания конца трубопровода к характерному поперечному размеру – корню квадратному из площади поперечного сечения.

Ключевые слова

рудничная вентиляция, тупиковый забой, нагнетательный способ проветривания, отставание вентиляционного трубопровода, натурный эксперимент, численный эксперимент, структура воздушных потоков

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).

Для цитирования

Kamenskikh A. A., Faynburg G. Z., Semin M. A., Tatsiy A. V. Experimental study on forced ventilation in dead-end mine working with various setbacks of the ventilation pipeline from the working face. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):41–52. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-147>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Experimental study on forced ventilation in dead-end mine working with various setbacks of the ventilation pipeline from the working face

A. A. Kamenskikh , G. Z. Faynburg , M. A. Semin , A. V. Tatsiy

*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russian Federation*

seminma@inbox.ru

Abstract

The study of airflow patterns at the ends of dead-end mine workings is crucial for optimizing underground mining ventilation systems. Understanding these patterns forms the basis for designing and implementing effective ventilation strategies.

Previous studies have shed light on the behavior of the main vortex and the formation of stagnant zones in such environments, but these insights remain fragmented and call for a more systematic exploration to integrate them into a comprehensive theory.

This paper presents the results of a thorough field investigation into the forced ventilation behavior in a dead-end mine working with a significant cross-sectional area (29.2 m²). We evaluated the impact of varying the setback distance of the ventilation duct's end from the working face at intervals of 10, 15, 17, 19, and 21 m. The experimental design included precise measurements of turbulent airflow velocities at 25 carefully chosen points (in a 5x5 grid) for each setback distance, covering the area from the working face to beyond the end of the ventilation duct. This included additional measurements taken 1 meter and 10 meters past the termination of the ventilation duct, moving towards the entrance of the working area.

The fieldwork was carried out in a typical dead-end stope at the Kupol gold-silver mine in the Chukotka Autonomous District, created by drilling and blasting.

The volume of fresh air delivered to the working was maintained at a consistent rate of 17.4 m³/s across all scenarios, aligning with the mine's standard air flow rate derived from the ventilation requirement for exhaust gases emitted by internal combustion engines of Load-Haul-Dump (LHD) machinery. With the duct's terminal cross-sectional area at 0.8 m², this resulted in an inflow velocity averaging 21.75 m/s.

Additionally, we included insights from three-dimensional numerical simulations performed in ANSYS Fluent, focusing on steady-state air movement and developed turbulence within the dead-end space. A comparative review of both empirical and modeled data shows that the ventilation jet, for all tested setback distances up to 21 m, successfully delivered air to the working face, where it then dispersed and initiated reverse flow patterns.

These experiments led to the formulation of a linear relationship between the maximum relative velocity (compared to the initial jet velocity) at a distance of 1 m from the working face and a key geometric factor of the ventilation setup. This factor is the ratio of the duct's setback distance to a characteristic dimension of the cross-sectional area, calculated as the square root of the cross-sectional area.

Keywords

mine ventilation, dead-end face, forced ventilation, ventilation pipeline setback, field experiment, numerical experiment, airflow structure

Funding

The research received financial support from from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. number NIOKTR 124020500030).

For citation

Kamenskikh A. A., Faynburg G. Z., Semin M. A., Tatsiy A. V. Experimental study on forced ventilation in dead-end mine working with various setbacks of the ventilation pipeline from the working face. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):41–52. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-147>



Введение

Обеспечение надежности эффективного проветривания тупиковых горных выработок является одной из ключевых задач рудничной вентиляции, регулируемых правилами безопасности ведения подземных горных работ¹ и привлекающих особое внимание отечественных [1–3] и зарубежных [4–6] исследователей. В литературе рассматривались особенности проветривания тупиковых горных выработок при различных способах выемки полезного ископаемого [7, 8], а также вопросы методологии моделирования аэрологических процессов в тупиковых выработках, связанные, в частности, с корректным выбором моделей турбулентности [6], применением подходов, основанных на дискретном моделировании [9]. Исследовались различные усложняющие факторы, например, непрерывное выделение пыли при работе комбайна [10], газовыделение в выработанном пространстве [8, 11], рассмотрение переноса кислорода как отдельного компонента воздушной среды [5]. Вводились и исследовались различные критерии для определения эффективности проветривания тупиковых выработок [4].

Отдельным и очень важным аспектом эффективного проветривания тупиковых горных выработок является выбор подходящего способа проветривания и эффективных параметров вентиляционного оборудования: положения вентиляционного трубопровода и расхода воздуха в нем [12]. Одним из наиболее часто применяемых на практике способов проветривания тупиковых горных выработок является нагнетательный способ проветривания, заключающийся в создании активной струи свежего воздуха, подаваемого по трубопроводу, конец которого отстает от груди забоя на то или иное расстояние (по технологическим причинам и/или в соответствии с правилами безопасности) [6, 13].

Основными геометрическими параметрами, определяющими объем V зоны такого проветривания, являются высота H и ширина B (т.е. фактически масштабы сечения S) выработки, а также отставание конца вентиляционного става от груди забоя L , которое формирует конфигурацию проветриваемого объема [14]. Назовем безразмерное отставание конца трубопровода от груди забоя, выраженное в единицах некоторого эквивалентного поперечного размера, за который выберем корень квадратный из площади сечения, форм-фактором объекта проветривания $f = L / \sqrt{S}$.

¹ Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. Утв. Госгортехнадзором СССР 21.10.1954 г. М.: Госгортехиздат, 1959.

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505. Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (Дата обращения: 20.06.2023).

В зависимости от используемых переменных и конкретной ситуации объем зоны проветривания $V = H \cdot B \cdot L$ или $V = S \cdot L$ либо принимается равным объему зоны отброса отпалочных газов, который определяется расчетом, использующим экспериментальные данные.

Эффективность проветривания и соотношение процессов вытеснения и смешения загрязненного воздуха свежим определяется расходом свежего воздуха Q_0 , подаваемого для проветривания, что при определенном диаметре d или площади сечения s трубопровода определяет среднюю скорость истечения вентиляционной струи U_0 . Именно эта вентиляционная струя формирует структуру течений в тупиковой выработке, зависящую от степени стеснения струи $F = s/S = (d/D)^2$, изменяющейся от 0 до 1, и ряда других параметров, определяющих соотношение процессов вытеснения и смешения в проветриваемом объеме.

Результирующим целевым показателем такого проветривания является качество воздуха в забое (во всех случаях), а для нестационарных задач – время проветривания от загрязнений, например, отпалочных газов при ведении буровзрывных работ, обеспечение нормативных величин которых определяет значение расхода свежего воздуха.

Из-за сложности структуры потоков и неоднозначности соотношения процессов вытеснения и смешения точное определение реального времени проветривания возможно только в натурном эксперименте.

На практике в качестве ориентира выбора времени проветривания используют расчетное время воздухообмена того или иного объема V загрязненного воздуха, равное

$$\tau = \frac{V}{Q}, \quad (1)$$

где Q – расход подаваемого в объем V объекта проветривания воздуха.

Минимальное время проветривания забоя достигается в том случае, когда в проветриваемой зоне реализуются процессы идеального вытеснения (адвективного переноса). Оно определяется по формуле (1). В противном случае – абсолютного доминирования процессов идеального смешения (перемешивания, разжижения), а также наличия застойных зон, время проветривания тупикового забоя, строго говоря, равно бесконечности. Фактическое время проветривания находится где-то в пределах этих достаточно широких границ.

Важным условием отсутствия застойных зон у груди забоя и превалирования процессов вытеснения является наличие деятельной струи. Для этого струя должна сохранять свою конфигурацию на расстоянии $L_{эфф}$ больше, чем отставание от груди забоя L , и тем самым активно «натекать» на грудь забоя, обеспечивая эффективный вынос загазованного и запыленного воздуха из призабойного пространства и забоя в целом. Это же требование можно записать в виде

$$L < L_{норм} < L_{эфф} \quad (2)$$

где $L_{норм}$ – предельная максимальная величина отставания, задаваемая правилами безопасности.



Таким образом, исследование структуры вентиляционных потоков в призабойной части тупиковой выработки является важным условием осознанно управляемой организации ее проветривания, в которой особую роль играют «дальнобойность» струи $L_{эфф}$ и отставание конца вентиляционного трубопровода от груди забоя L , а также расход подаваемого свежего воздуха Q_0 (при заданной площади сечения выработки и трубопровода).

Основные представления о структуре вентиляционных потоков в тупиковой выработке, проветриваемой нагнетательным способом

Существенный вклад в исследования проветривания тупиковых горных выработок (глухих забоев) более полвека назад внесли И. А. Швырков [1], А. И. Ксенофонтова [2], В. Н. Воронин [3], П. И. Мустель [15] и другие исследователи [16–18]. Ими было теоретически рассмотрено струйное проветривание тупиковых камерообразных выработок, сформировано основное представление о механизмах удаления из забоя загрязненного воздуха за счет процессов смешения и вытеснения, дана связь эффективности действия струи в зависимости от площади поперечного сечения выработки [18]

$$L_{эфф} = K\sqrt{S}, \quad (3)$$

где безразмерный коэффициент пропорциональности K , определяемый экспериментально или теоретически, меняется на практике в очень широких пределах (от 2 до 8), но чаще всего – в пределах $K = (3–6)$ [14]. Это означает зависимость K от других условий организации проветривания и требует для выяснения относительно широкомасштабных исследований.

Формулу (3) можно переписать в виде

$$\frac{L_{эфф}}{\sqrt{S}} = k \frac{L}{\sqrt{S}}, \quad (4)$$

где k – новый коэффициент, связанный со старым K формулой $K = kf$, что позволяет вычлени роль форм-фактора f . Формула (2) дает основание считать, что $k > 1$.

Заметим, что для классического отставания вентиляционного трубопровода L в 10 м форм-фактор (при размере сечения выработки 3×3) равен 3,33, а при размере 2×2 равен 5. Разрешенное действующими правилами безопасности отставание в 15 м при сечении выработки более 16 м^2 дает значение $f = 3,75$.

В ряде зарубежных работ [4, 6, 13] формула (3) приводится в виде

$$L_{эфф} = 4\sqrt{S} \quad (5)$$

или в ином виде, использующем значение диаметра вентиляционного трубопровода d ,

$$L_{эфф} = 30d. \quad (6)$$

Заметим, что интуитивно понимаемое понятие «дальнобойность струи», обозначенное нами как $L_{эфф}$, формально нигде не определено, что вызывает различ-

ные толкования этого понятия, а значение коэффициента в формуле (3) меняется в зависимости от сечения выработки, расположения трубопровода, его сечения, скорости струи и других условий проветривания.

Строго говоря, там, где суммарный расход движения воздуха к груди забоя (без учета турбулентных пульсаций) становится практически равным нулю, струя заканчивается. Расстояние до этого сечения от конца вентиляционного става и есть «дальнобойность» струи, т.е. дальность, на которую она «бьет». Определим это расстояние, обозначенное нами как $L_{эфф}$, более строго.

Таким относительно строгим, но достаточным для действенного проветривания значением расхода воздуха (в том или ином сечении около груди забоя), можно считать такой расход $Q_{орг}$, который обеспечит время проветривания призабойного пространства около груди забоя $V_{орг}$, меньшее или равное времени проветривания всего забоя:

$$t_{эфф} = \frac{V_{орг}}{Q_{орг}} \leq t_{заб} = \frac{V}{Q_0}. \quad (7)$$

В качестве размера призабойного пространства, исходя из размера зоны дыхания человека, т.е. пространства радиусом 0,5 м от лица работающего (согласно СНиП 41 01 2003), можно выбрать пространство между грудью забоя и сечением, отстоящим на 1 м от груди забоя. Обозначим связанное с этим пространством расстояние до конца става трубопровода как L_1 .

Количество воздуха, поступающего в это пространство, можно увязать с значением минимальной скорости, определяемой правилами безопасности по формуле: $U_{min} = 0,1 P/S$ (м/с), где S – площадь поперечного сечения выработки, м^2 ; а P – периметр выработки, м, что дает для условий нашего эксперимента 0,07 м/с. Важно отметить, что это составляет 0,32 % от значения начальной скорости струи на выходе от вентиляционного трубопровода ($U_0 = 21,75$ м/с) по данным натурного эксперимента, который будет описан в работе далее.

Заметим, что ощутимая человеком (и крыльчатым анемометром) скорость воздуха составляет примерно 0,15 м/с, что дает 0,69 % от U_0 , а классическая минимальная скорость для очистных забоев, установленная равной 0,25 м/с, составляет 1,15 % от U_0 . В этом случае время проветривания призабойного пространства на расстоянии 1 м от груди забоя для условий нашего натурного эксперимента будет равно 8 с.

Практика показала, что эффективность действия струи в тупике (в стеснении) увеличивается при увеличении сечения выработки, поскольку в выработках большего сечения струя может развиваться на большие расстояния, не сталкиваясь с сопротивлением возвратного течения. Само же возвратное течение неизбежно возникает в тупике, ибо это следует из закона сохранения массы и уравнения неразрывности.

Однако ограниченность аналитических методов анализа не позволяла в полной мере исследовать трехмерные вихреобразные структуры реализуемого при нагнетательном способе проветривания течения.



С развитием вычислительных методов и мощностей компьютеров все большее число исследователей стало применять для исследования проветривания тупиковых выработок средства математического моделирования в трехмерной постановке [7, 8, 19].

Так, в работе Н.О. Калединой и С.С. Кобылкина [16] методами численного трехмерного моделирования был исследован способ проветривания тупиковых протяженных выработок на газообильных шахтах, где обильное газовыделение легких горючих газов существенно влияет на обеспечение безопасности ведения горных работ, а в работе Е.В. Колесова и Б.П. Казакова [18] методами численного трехмерного моделирования исследовано проветривание тупиковых выработок после взрывных работ.

В статье [20] рассмотрены вопросы проветривания тупиковой выработки при различном отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя и при разных скоростях воздушной струи, выходящей из вентиляционного трубопровода.

Во всех этих работах обсуждаются выбор модели турбулентности, методы численного решения, полученные результаты, как правило, для нескольких частных конкретных случаев.

Анализ этих работ показывает, что, несмотря на общее понимание протекающих в тупиковой выработке процессов возникновения основного вихря и застойных зон, полученные результаты носят фрагментарный характер и практически без дополнительных исследований не поддаются единому концептуальному обобщению.

В гораздо меньшей мере по сравнению с вычислительным экспериментом известны результаты натурных экспериментов, связанных в основном с фиксацией времени проветривания забоя и общим проникинанием струи в тупик.

Если на протяжении почти столетия одним из ключевых обязательных требований² к нагнетательному способу проветривания тупиковых выработок было соблюдение отставания от конца вентиляционного става до груди забоя не более 10, что соответствовало использованию 400–600-миллиметровых труб, маломощных вентиляторов с типичными для того времени размерами тупиковых выработок (примерно сечением 2×2 м – форм-фактор $f = 5$), то современная редакция ФНиП ПБ³ говорит (помимо классического случая с 10-метровым отставанием) о допустимости отставания нагнетательного вентиляционного трубопровода от груди забоя 15 м при сечении забоя более 16 м^2 (форм-фактор $f < 3,75$).

² Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. Утв. Госгортехнадзором СССР 21.10.1954 г. М.: Госгортехиздат, 1959.

³ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505. Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (Дата обращения: 20.06.2023).

Вместе с тем такая ситуация сдерживает практику (см., например, обзор обоснований безопасности в [18]), а для её развития нужно углубленное научно обоснованное понимание происходящих в тупиковом забое процессов проветривания. Именно этому посвящено настоящее исследование.

Результаты детальных натурных исследований нагнетательного проветривания тупикового забоя в конкретных условиях золотосеребряного рудника «Купол» и некоторые результаты численного моделирования, дополняющие натурный эксперимент, приведены ниже.

Объект натурального исследования

Рудник «Купол» расположен на Крайнем Северо-Востоке Российской Федерации в зоне многолетней мерзлоты. С целью недопущения растепления горных пород и повышения их устойчивости предусмотрено проветривание подземных горных выработок нагнетательным способом при температуре поступающего воздуха в рудник -20°C и ниже без его подогрева. Месторождение не опасно по газам и пыли.

Проходку всех горно-капитальных и подготовительно-нарезных выработок, а также очистную выемку на руднике «Купол» осуществляют буровзрывным способом, учитывая высокие прочностные характеристики руд и пород. Буровзрывные работы проводят ежесуточно в две смены с двумя часовыми междуменными перерывами и двумя перерывами на обед. При этом буровые работы и отгрузку отбитой руды проводят во время рабочей смены, а взрывные работы – между сменами и в обеденный перерыв.

В цикл горнопроходческих работ помимо бурения шпуров, заряжания и взрывания в них зарядов взрывчатого вещества, а также погрузки и транспортирования отбитой руды из забоя входят проветривание забоя и приведение забоя в безопасное состояние. Для выполнения основных работ проходческого цикла применяется высокопроизводительное самоходное оборудование.

Типичный тупиковый забой рудника «Купол» имеет длину от 15 до 150 м, сечение в свету в среднем $29,2 \text{ м}^2$, а уходка забоя за взрывание составляет в среднем 4,2 м. Основная масса отбитой руды складывается взрывом на расстоянии 10–15 м от груди забоя, а отдельные куски разлетаются на расстояние до 40 м, что может повредить вентиляционный трубопровод. Поэтому, с учетом того, что длина погрузочно-доставочной машины с ДВС равна примерно 12 м, желательно иметь отставание вентиляционного става от груди забоя порядка 20 м.

Нагнетательный трубопровод стандартно подвешивается справа под кровлю выработки и имеет диаметр $d = 1,2$ м (сечение $s = 1,13 \text{ м}^2$).

Для предотвращения колебаний конца трубопровода (так называемое «хлюпанье») и соответствующих пульсаций потока вентиляционный трубопровод на выходе заужают, создавая своеобразный «конфузор». Данный прием является стандартным для всех нагнетательных вентиляционных трубопроводов на руднике «Купол». Площадь сечения «сопла» этого



«конфузорного» конца вентиляционного трубопровода составляет $0,75\text{--}0,8\text{ м}^2$ (степень поджатия 1,4). Это усиливает устойчивость истечения струи и увеличивает ее фактическую дальность.

Методика проведения натурного эксперимента

Экспериментальные исследования были выполнены в тупиковой горной выработке (квершлага NE 931-250) рудника «Купол». Во время проведения исследования на вентиляционный нагнетательный трубопровод работал ВМП Alphaair 4200-VAX-2700 с номинальной производительностью $17,9\text{ м}^3/\text{с}$ и напором 233,5 даПа.

Измерения скоростей воздушного потока проводились в установившемся режиме течения, которое создавалось путем подачи в забой струи свежего воздуха с расходом в $17,4\text{ м}^3/\text{с}$ (начальная скорость струи $21,75\text{ м/с}$).

Рассматривали пять вариантов отставания конца вентиляционного трубопровода от груди забоя. Первый вариант – классическое отставание в 10 м; второй вариант – отставание в 15 м, разрешенное правилами безопасности для данной выработки, сечение которой более 16 м^2 . Пилотные варианты: отставание в 17, 19 и 21 м. Последний вариант наиболее интересовал нас и руководство рудника «Купол» как наиболее реалистичный и приемлемый для внедрения в практику.

Для детального исследования пространственной структуры потока весь объем воздушного пространства тупикового забоя покрывался сеткой точек измерения скорости. В каждом выбранном для измерения сечении измерения скорости производили в 25 точках (сетка 5×5 с межточечным интервалом в $0,75\text{ м}$, около стенок – порядка 1 м).

Сечения выбирали по схеме – через каждый метр от груди забоя (1, 2, 3, 4...), включая сечение, расположенное в 1 м от конца става к груди забоя. Кроме того, во всех вариантах производили измерения в двух сечениях, расположенных через 1 м и через 10 м от конца вентиляционного става к устью выработки. Последнее сечение использовали для замеров исходящего из выработки потока. Для контроля полученных данных проводили сравнение расходов входящего и исходящего потоков воздуха. Такая «сетка» сечений и точек замера скоростей позволяла охватить все зоны течения и выявить основные закономерности его пространственной структуры.

Для измерения скорости воздушного потока использовали два анемометра АПР-2. Погрешность анемометра составила $\pm(0,2 + 0,05U)\text{ м/с}$, где U – скорость воздушного потока.

Расстояния в тупиковой горной выработке определяли с помощью лазерного дальномера Leica DISTO D3 с точностью измерения $\pm 1,5\text{ мм}$.

Отдельные моменты реализации и закономерностей изменения пространственной структуры течения уточняли по результатам трехмерного математического моделирования в вычислительном пакете ANSYS Fluent.

И натурный, и численный эксперименты показали одну и ту же картину течения в тупиковой выработке при нагнетательном способе проветривания и различных отставаниях конца вентиляционного трубопровода в пределах $15\text{--}21\text{ м}$ (форм-фактор равен $f = L/\sqrt{S} = 2,78, 3,14, 3,52, 3,89$).

Отставание в 10 м рассматривалось для сравнения, поскольку для него $L/\sqrt{S}$ достаточно мало ($f = 1,85$) и нехарактерно для практики.

Результаты натурного и численного экспериментов

При длинах отставания $15\text{--}21\text{ м}$ конца вентиляционного става от груди забоя (площадь сечения $29,2\text{ м}^2$) расширяющаяся струя формирует большой основной вихрь, занимающий все проветриваемое пространство, что в целом соответствует хорошо известным по уже опубликованным работам представлениям.

Заметим, что образование этого вихря следует из закона сохранения массы (уравнения неразрывности) и справедливо при различных вариантах реализации нагнетательного способа проветривания, что и подтвердили детальный натурный и численный эксперименты. Однако замеры и расчеты помогли выявить и новые моменты.

Сформулируем основные закономерности вихревого течения, формирующегося при втекании стесненной струи в тупиковый забой.

Расход свежего воздуха в поступающей струе Q_0 равен расходу исходящего из тупиковой выработки воздуха Q_- . Поэтому с учетом закона сохранения массы средние по соответствующему сечению скорости поступающей в выработку струи Q_0 и исходящего из выработки (около ее устья) воздуха U_- соотносятся как площадь сечения выработки S к площади сечения трубопровода s .

Несложно получить, что отношение кинетической энергии поступающего потока E_0 , выраженной через U_0 , к кинетической энергии исходящего потока E_- , выраженной через U_- , равно отношению скорости струи в начальном сечении к скорости исходящего из тупиковой выработки воздуха.

В алгебраической форме вышеизложенные фундаментальные соотношения нагнетательного проветривания (для постоянной плотности) имеют вид:

$$\frac{U_0}{U_-} = \frac{S}{s}, \quad \frac{E_0}{E_-} = \frac{U_0^2 s}{U_-^2 S} = \frac{U_0}{U_-} = \frac{S}{s}. \quad (8)$$

Из этих фундаментальных соотношений следует, что чем больше отношение S/s , тем энергетически мощнее будет струя, тем большую энергию она может затратить на вихреобразование (включая турбулентные пульсации) и на «пробивание своего пути» к груди забоя. Для нашего случая это соотношение равно $36,25$. Заметим, что для классической выработки $4\text{ м}^2 = 2\text{ м} \times 2\text{ м}$ с 400-миллиметровым трубопроводом оно, как и для выработки сечением 16 м^2 с 800-миллиметровым трубопроводом, меньше и равно $31,85$.

На рис. 1, полученном в результате численного моделирования для нормативно разрешенного отста-

вания в выработках с площадью поперечного сечения большего, чем 16 м^2 , конца вентиляционного става от груди забоя в 15 м , хорошо видно, как струя «натыкается» на грудь забоя и «расплескивается» на ней по её поверхности, вызывая эффективное проветривание пространства около груди забоя и формируя «начало» возвратного течения. Численное моделирование производилось в программном пакете Ansys Fluent в стационарной постановке с использованием модели турбулентности Realizable k-epsilon [21–23].

Поскольку ось вентиляционного трубопровода расположена из соображений удобства реализации технологического процесса сверху справа (если смотреть на грудь забоя), то сечение выработки с аэродинамической точки зрения делится на «спутную» зону, примыкающую к оси вентиляционной струи в правой верхней (условно отделенной диагональю верх слева – низ справа) половине сечения выработки, в которой увлекаемый активной струей воздух движется к груди забоя, и «возвратную» зону, в которой воздух движется от груди забоя.

Такая основная крупномасштабная структура течения хорошо просматривается и в натурном эксперименте (рис. 2, а, б), и при компьютерном моделировании (рис. 3) и характеризует структуру движения воздуха в забое в целом.

При этом в любом сечении тупиковой выработки соблюдается баланс массы – расход потока, текущего от груди забоя (возвратный и/или исходящий поток), равен расходу потока к груди забоя (спутный и/или свежий поток, втекающий через трубопровод).

Поэтому расход потока, текущего к груди забоя, меняется от сечения к сечению, что позволяет разбить все пространство тупиковой выработки при нормальном проветривании активной струей на пять условно выделенных зон (от груди забоя): 1-я – зона основного разворота потока вблизи груди забоя

и «омывания» его поверхности; 2-я – зона «головы» и «тела» основного вихря структуры потоков от конца вентстава до разворота и формирования основного возвратного течения от груди забоя; 3-я – зона «хвоста» основного вихря, вызванного эжекцией (подсосом) воздуха не только «сбоку» струи, но и из-за стеснения «из-за спины» струи вокруг конца вентиляционного трубопровода; 4-я – зона «возврата» потока в «хвосте» основного вихря, приводящая к несимметричному распределению скоростей потока; 5-я – зона классического потока истечения, в которой все сечение выработки занято вытекающим потоком, причем скорость имеет только осевую (вдоль оси протяженности выработки) составляющую (без учета турбулентных пульсаций). Схематичное изображение 5-зонной структуры приведено на рис. 4.

Тогда «продольный (осевой) расход» воздуха практически близок к нулю в 1-й зоне; существенно больше подаваемого для проветривания расхода воздуха во 2-й и 3-й зоне и равен подаваемому для проветривания расходу воздуха в 4-й и 5-й зоне.

Подчеркнем, что такая 5-зонная (по протяжению выработки) структура описывает активное и вполне достаточное для проветривания действие струи, когда струя достигает груди забоя.

Если же энергии и импульса струи не хватает для достижения груди забоя, то возникает 6-я зона – зона «вторичного» вихря. Более того, в ней может возникнуть не один вихрь, а целая система вихрей убывающей интенсивности, что в целом характеризуется образованием «застойной» зоны.

В наших натурном и численном исследованиях при отставании в 21 м максимум (форм-фактор равен $3,75$) мы не наблюдали возникновения застойной зоны, поскольку отставание в 21 м в вышеописанных условиях (сечение выработки, расход свежего воздуха) обеспечивало интенсивное «натекание» струи на грудь забоя.

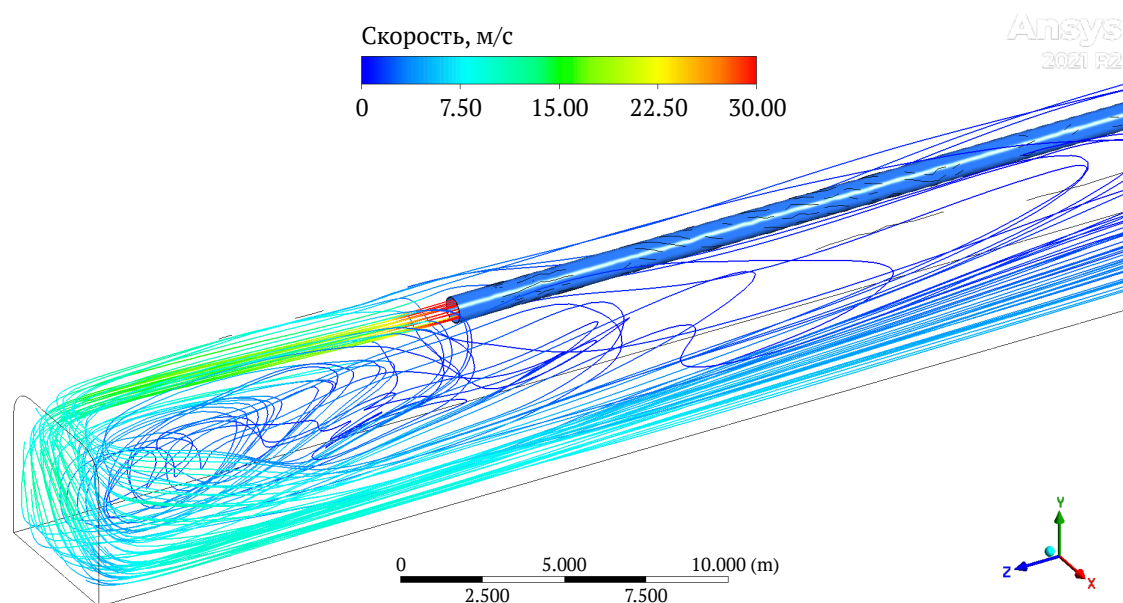


Рис. 1. Пример пространственной структуры линий тока с цветовой индикацией, соответствующей модулю вектора скорости, при нагнетательном проветривании тупиковой выработки с отставанием конца вентиляционного става от груди забоя в 15 м , в котором струя «набегает» на грудь забоя

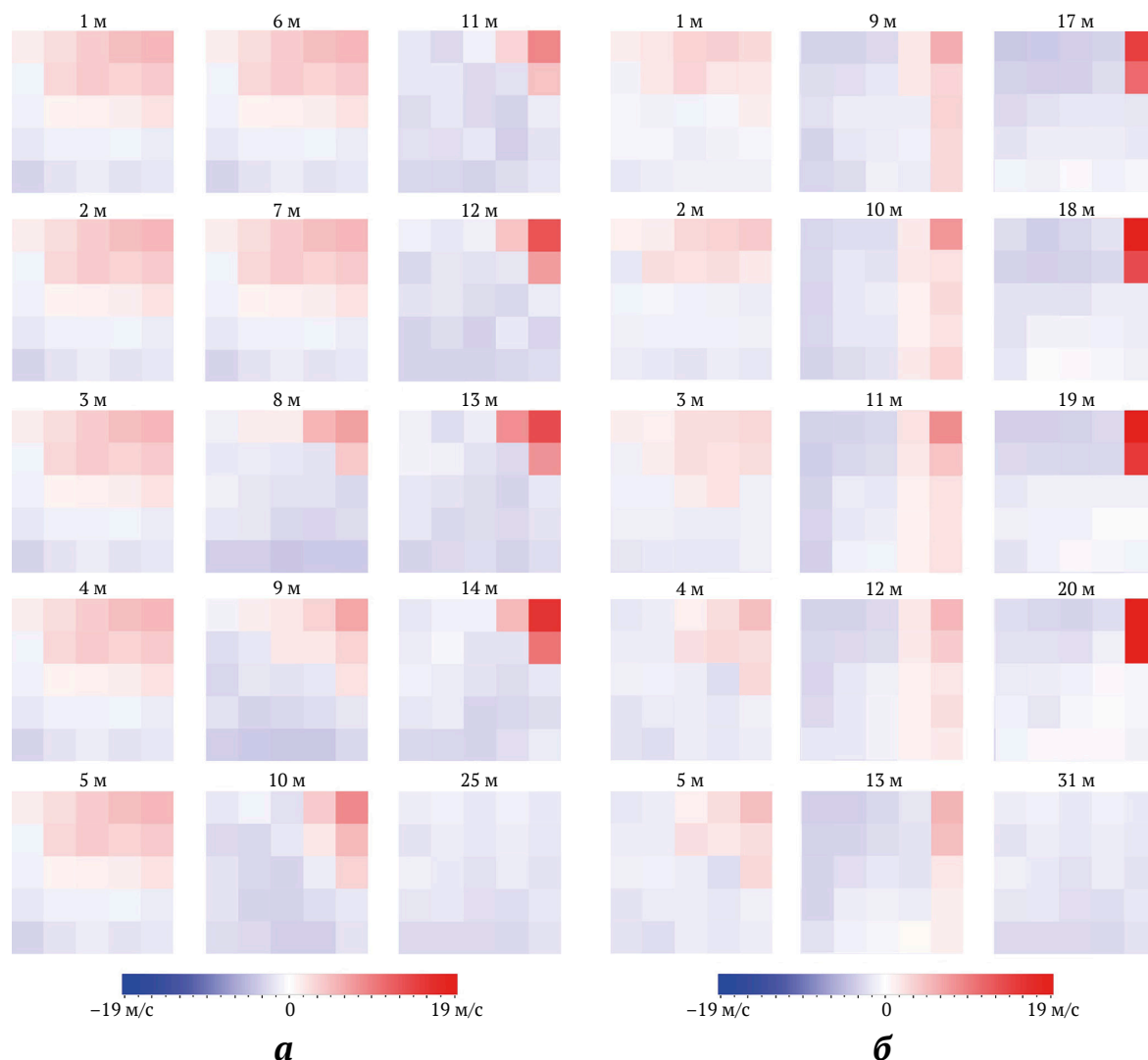


Рис. 2. Результаты замеров значений скорости воздушного потока в различных сечениях и замерных точках при отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя: *а* – на 15 м (примечание: 25 м находится в 10 м от конца трубопровода к устью выработки); *б* – на 21 м (примечание: 31 м находится в 10 м от конца трубопровода к устью выработки)

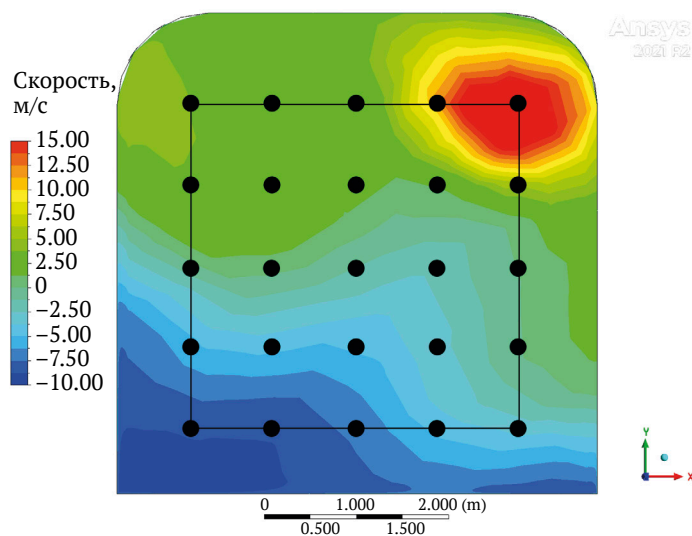


Рис. 3. Рассчитанное распределение скорости воздуха в поперечном сечении горной выработки (вид на грудь забоя) на расстоянии 5 м от груди забоя при отставании конца става 10 м и стандартная «сетка» замерных точек скорости воздуха в натурном эксперименте

На рис. 5 приведены распределения величины спутного (от груди забоя) потока воздуха по длине всей выработки, отнесенного к расходу воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода. Величина спутного потока воздуха рассчитывалась как интеграл осевой компоненты скорости воздушного потока в выработке по той части поперечного сечения выработки, на которой движение воздуха направлено от забоя к устью выработки.

Во всех трех модельных случаях в призабойной части выработки наблюдался единый вихрь, имеющий сложную трехмерную структуру. Вследствие его асимметричности вблизи забоя (на расстоянии 3–4 м) наблюдался локальный максимум спутного потока воздуха (см. рис. 5).

В общем случае в зоне 1, примыкающей к груди забоя, возможны три варианта течения: «натывание» струи на грудь забоя, «омывание» поступающим воздухом груди забоя, «изоляция» груди забоя от деветельной струи другим вихрем низкой интенсивности – застойной зоной. Повторим, что последнее в наших натурном и численном экспериментах (до 21 м отставания) не наблюдалось.

Величины продольной скорости направленного на грудь забоя потока течения на расстоянии 1 м от груди забоя преимущественно находятся в интервале 10–20 % от начальной скорости струи, поступающей

в выработку, что обеспечивает эффективное проветривание призабойного пространства и исключает образование застойных зон.

При этом значения скорости имеют тенденцию к падению по мере нарастания отставания трубопровода от груди забоя или в условиях описываемого эксперимента с постоянным сечением выработки – от роста форм-фактора (рис. 6).

Хорошо видно, что для условий вышеописанного эксперимента струя еще не исчерпала возможности движения вперед при отставании в 21 м для выработки в 29,2 м² (форм-фактор равен 3,75) и подаче свежего воздуха в 17,4 м³/с. Однако при увеличении отставания (значении форм-фактора порядка 6) наступает предел дальности струи.

Проведенная на рис. 6 методом наименьших квадратов линия соответствует формуле:

$$\frac{U_{\max}(L-1)}{U_0} = 0,388 - 0,065 \frac{L}{\sqrt{S}}. \quad (9)$$

Результаты численного эксперимента показывают аналогичную картину. На расстоянии 1 м от груди забоя для максимальной продольной скорости имеем

$$\frac{U_{\max}(L-1)}{U_0} = 0,554 - 0,083 \frac{L}{\sqrt{S}}. \quad (10)$$

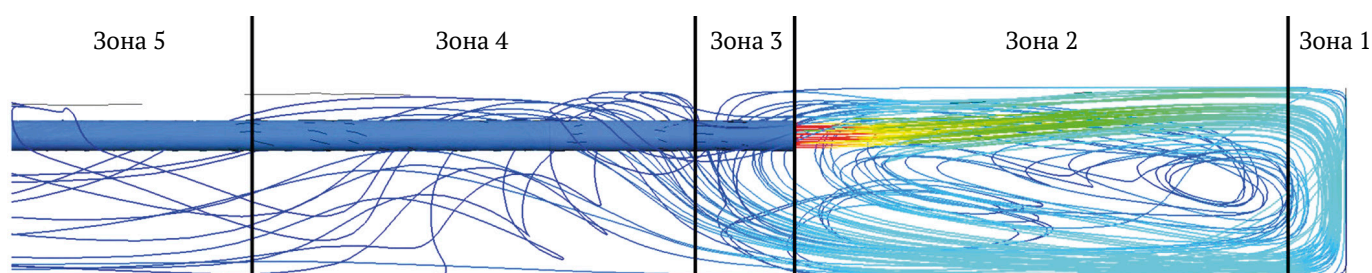


Рис. 4. Схематическое изображение 5-зонной структуры проветривания тупикового забоя

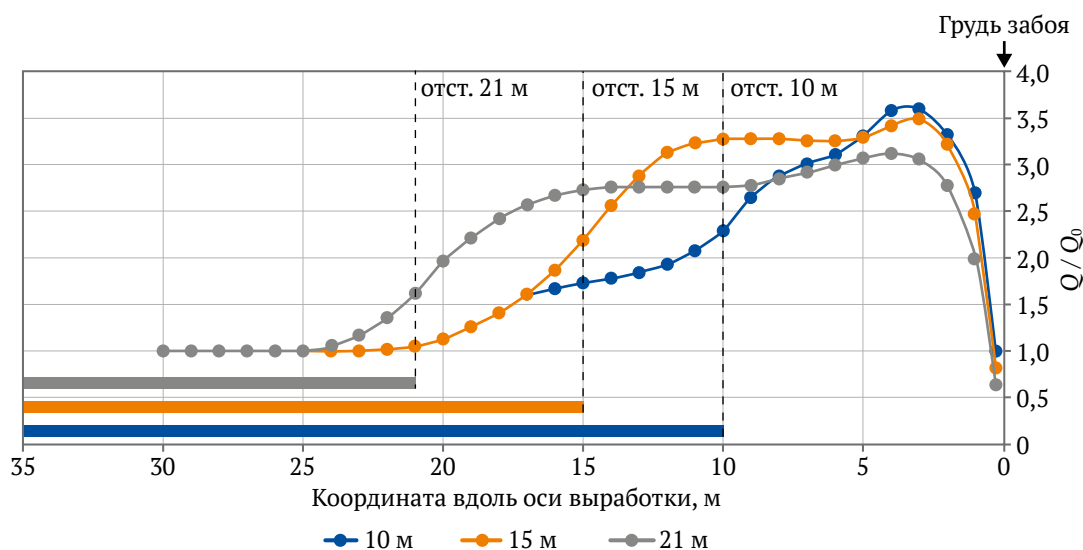


Рис. 5. Численно рассчитанные зависимости спутного потока воздуха от координаты вдоль оси выработки при различных вариантах отставания конца вентиляционного трубопровода (вертикальными пунктирными линиями для наглядности показаны места расположения конца вентиляционного трубопровода)

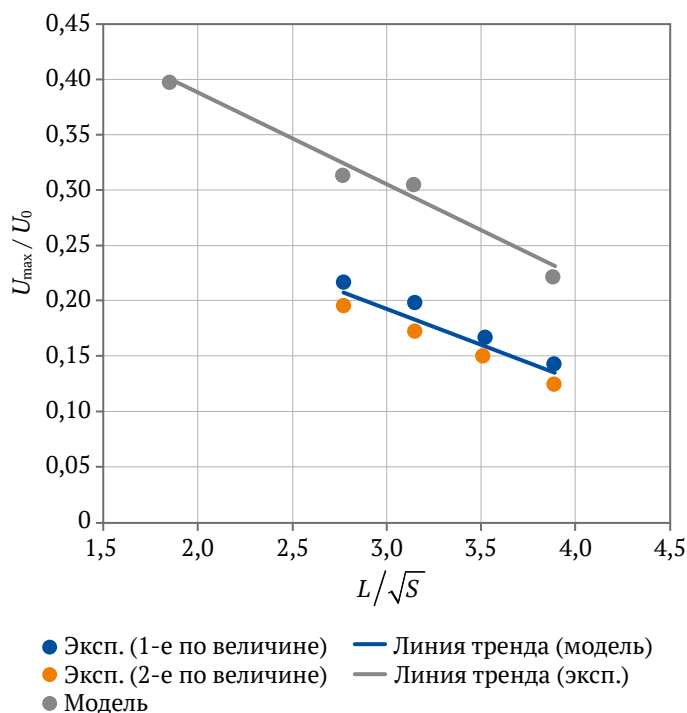


Рис. 6. Зависимость максимальной относительной к начальной скорости струи продольной скорости к груди забоя от форм-фактора; данные моделирования, данные эксперимента: два наибольших по величине значения в точках замера в 1 м от груди забоя

Численно рассчитанная зависимость расхода спутного потока воздуха от параметра $L/\sqrt{S}$ в метре от забоя имеет вид:

$$\frac{Q(L-1)}{Q_0} = 0,195 - 0,02 \frac{L}{\sqrt{S}}. \quad (11)$$

Величины (9) и (10) примерно пропорциональны друг другу, однако численно рассчитанные относительные максимальные скорости воздуха в сечении в 1 м от забоя оказываются примерно в 1,7–1,8 раза выше. Мы связываем это как минимум с двумя факторами:

1) модельным учетом такого возможного нестационарного фактора, имеющего случайную природу, как колебание конца вентиляционного трубопровода;

1) неточным попаданием замерных точек в локальную зону рассматриваемого сечения выработки, где имеет место максимальная скорость потока.

В данном случае важно то, что поле скоростей в численном моделировании оказывается не ниже, чем в эксперименте, что позволяет использовать данные эксперимента в качестве нижней, наиболее жесткой оценки для эффективности проветривания выработки.

Из формул (9)–(11) хорошо видно, что в пределах $L < 6\sqrt{S}$ дальнобойность струи достаточна для эффективного проветривания забоя ($100\% U_{max}/U > 1,15\%$), что лишний раз подтверждает правомерность формул (1)–(3).

Таким образом, результаты натурного эксперимента показывают, что уменьшение интенсивности

воздухообмена по мере удаления от конца трубопровода в эксперименте происходит таким образом, что открывает возможность значительного увеличения отставания конца вентиляционного става от груди забоя при значении форм-фактора менее 6.

Выводы

Натурный эксперимент по исследованию структуры потоков (замеры скорости воздуха) в тупиковой выработке при нагнетательном способе проветривания выполнен для пяти вариантов отставания конца става вентиляционного трубопровода диаметром 1200 мм в 10, 15, 17, 19, 21 м при сечении выработки в среднем – 29,2 м², подаче свежего воздуха – 17,4 м³/с, площади сечения начального диаметра струи – 0,75–0,8 м², что обеспечивало начальную скорость струи в 21,75–23,8 м/с и в целом благоприятные для эффективного проветривания условия для существования дальнобойной струи.

Во всех исследованных случаях отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя (от 10 до 21 м) вентиляционная струя, выходящая из вентиляционного трубопровода, достигает груди забоя тупиковой выработки, омывает его, разворачивается и направляется к устью тупиковой выработки, создавая при этом в призабойной проветриваемой зоне выработки множество турбулентных вихрей различного масштаба, активно перемешивающих поток.

В итоге перемешанный практически до однородности воздух в забое вытесняется свежей струей и выносится из забоя на исходящую струю. При этом застойные зоны, где в принципе может задерживаться загрязненный отпалочными газами и пылью воздух, не образуются и в натурном эксперименте не наблюдались.

Уточняющие данные натурного эксперимента результаты компьютерного моделирования трехмерного турбулентного течения в программе ANSYS показывают аналогичную наблюдаемой в натурном эксперименте картину.

Во всех рассмотренных случаях исходящий воздушный поток в горной выработке стабилизировался на расстоянии 10 м за концевой частью вентиляционного трубопровода в сторону сопряжения со сквозной выработкой, оставаясь далее неизменным по мере приближения к груди забоя.

В результате анализа результатов проведенного исследования был сделан обоснованный вывод о возможности увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя до 20 м при ведении проходческих работ в тупиковых горных выработках при сечении более 20 м², при скорости воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода порядка 20 м/с.

Результаты проведенных исследований легли в основу разработанного и успешно внедренного в практику обоснования безопасности опасного производственного объекта, которое обеспечивает высокую производительность и соответствующий стабильный уровень безопасности ведения подземных горных работ на золотосеребряном руднике «Купол».



Список литературы / References

1. Швырков И.А. Проветривание глухих забоев после паления. *Безопасность труда в горной промышленности*. 1934;(5):5–12; 1934(6):4–15.
Shvyrkov I.A. Ventilation of blind faces after burning. *Occupational Safety in Industry*. 1934;(5):5–12; 1934(6):4–15. (In Russ.)
2. Ксенофонтова А.И., Воропаев А.Ф. *Проветривание глухих выработок*. М.: Углетехиздат; 1944. 112 с.
Ksenofontova A.I., Voropaev A.F. *Ventilation of blind workings*. Moscow: Ugletekhizdat; 1944. 112 p. (In Russ.)
3. Воронин В.Н. *Основы рудничной аэро-газодинамики*. М.-Л.: Углетехиздат; 1951. 492 с.
Voronin V.N. *Fundamentals of mine aero-gas dynamics*. Moscow-Leningrad: Ugletekhizdat; 1951. 492 p. (In Russ.)
4. Adjiski V., Mirakovski D., Despodov Z., Mijalkovski S. Determining optimal distance from outlet of auxiliary forcing ventilation system to development of heading in underground mines. *Journal of Mining and Environment*. 2019;10(4):821–832. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8140.1683>
5. Li Z., Li R., Xu Y., Xu Y. Study on the optimization and oxygen-enrichment effect of ventilation scheme in a blind heading of plateau mine. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(14):8717. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148717>
6. 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*. 2016;745:032045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032045>
7. Козырев С.А., Амосов П.В. Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей. В: *Аэрология и безопасность горных предприятий. Сборник научных трудов*. 2013;(1):23–29.
Kozyrev S.A., Amosov P.V. Mathematical modeling of blind working ventilation during blasting works with CFD-models used. In: *Aerology and Safety of Mining Enterprises. Collection of Research Papers*. 2013;(1):23–29. (In Russ.)
8. Кулик А.И., Тимченко А.Н., Костеренко В.Н., Кобылкин С.С. Особенности моделирования аэрогазодинамики очистного забоя угольной шахты. *Уголь*. 2023;(3):75–78. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-75-78>
Kulik A.I., Timchenko A.N., Kosterenko V.N., Kobylkin S.S. Features of modelling aerogasodynamics of coal mine face. *Ugol'*. 2023;(3):75–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-75-78>
9. Juganda A., Strebinger C., Brune J. F. Discrete modelling of a longwall coalmine gob for CFD simulation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;(30):463–469.
10. Isaevich A., Semin M., Levin L. et al. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*. 2022;14(5):3030. <https://doi.org/10.3390/su14053030>
11. Liu A., Liu S., Wang G., Elsworth D. Predicting fugitive gas emissions from gob-to-face in longwall coal mines: coupled analytical and numerical modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;150:119392. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119392>
12. Xin S., Wang W., Zhang N. et al. Comparative studies on control of thermal environment in development headings using force/exhaust overlap ventilation systems. *Journal of Building Engineering*. 2021;38:102227. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102227>
13. García-Díaz M., Sierra C., Miguel-González C., Pereiras B. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels. *Energies*. 2019;12(17):3352. <https://doi.org/10.3390/en12173352>
14. Файнбург Г.З. *Цифровизация процессов проветривания калийных рудников*. Монография. Пермь-Екатеринбург; 2020. 422 с.
Fainburg G.Z. *Digitalization of the processes of ventilation of potash mines*. Monograph. Perm-Ekaterinburg; 2020. 422 p. (In Russ.)
15. Мустель П.И. *Рудничная аэрология*. М.: Недра; 1970. 215 с.
Mustel P. I. *Mine aerology*. M.: Nedra Publ.; 1970. 215 p. (In Russ.)
16. Каледина Н.О., Кобылкин С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт. *Горный журнал*. 2014;(12):99–104.
Kaledina N.O., Kobylkin S.S. On the choice of a method for ventilating dead-end mine workings in gas-rich coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(12):99–104. (In Russ.)
17. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;(7):15–23. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2715>
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;(7):15–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2715>
18. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальноточности направленной в тупик воздушной струи. *Известия Томского политехниче-*



- ского университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(9):27–36. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3624>
- Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. Ejecting the return air flow on increasing the range of the air jet directed into the face of the dead-end drift. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(9):27–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3624>
19. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(6):5–33. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_5
- Kazakov B.P., Kolesov E.V., Nakariakov E.V., Isaevich A.G. Models and methods of aerogasdynamic calculations for ventilation networks in underground mines: Review. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(6):5–33. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_5
20. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки. *Известия Вузов. Горный журнал*. 1978;(11):47–50.
- Mostepanov Yu.B. Study of the range of a constrained jet acting in the face of a dead-end mine. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 1978;(11):47–50. (In Russ.)
21. Parra M.T., Villafruela J.M., Castro F., Mendez C. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*. 2006;41(2):87–93. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.002>
22. 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;89:68–77. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022>
23. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(2):46–57. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57>
- 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 Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(2):46–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57>

Информация об авторах

Антон Алексеевич Каменских – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6456-5487](https://orcid.org/0000-0002-6456-5487); e-mail timir2418@gmail.com

Григорий Захарович Файнбург – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9599-7581](https://orcid.org/0000-0002-9599-7581), Scopus ID [57217891724](https://orcid.org/57217891724); e-mail faynburg@mail.ru

Михаил Александрович Семин – доктор технических наук, ученый секретарь, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5200-7931](https://orcid.org/0000-0001-5200-7931), Scopus ID [56462570900](https://orcid.org/56462570900), ResearcherID [S-8980-2016](https://orcid.org/S-8980-2016); e-mail seminma@inbox.ru

Алексей Вадимович Таций – инженер, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0001-2514-6204](https://orcid.org/0009-0001-2514-6204); e-mail alexeytacy@gmail.com

Information about the authors

Anton A. Kamenskikh – Cand. Sci. (Eng.), Researcher at the Department of Aerology and Thermophysics, Chief Researcher of the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6456-5487](https://orcid.org/0000-0002-6456-5487); e-mail timir2418@gmail.com

Grigoriy Z. Faynburg – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9599-7581](https://orcid.org/0000-0002-9599-7581), Scopus ID [57217891724](https://orcid.org/57217891724); e-mail faynburg@mail.ru

Mikhail A. Semin – Dr. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5200-7931](https://orcid.org/0000-0001-5200-7931), Scopus ID [56462570900](https://orcid.org/56462570900), ResearcherID [S-8980-2016](https://orcid.org/S-8980-2016); e-mail seminma@inbox.ru

Aleksey V. Tatsiy – Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0001-2514-6204](https://orcid.org/0009-0001-2514-6204); e-mail alexeytacy@gmail.com

Поступила в редакцию

28.08.2023

Received

28.08.2023

Поступила после рецензирования

31.01.2024

Revised

31.01.2024

Принята к публикации

02.02.2024

Accepted

02.02.2024