

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕГОРОДОК

Станислав Александрович Павлов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел. (383) 205-30-30 (доб. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования аэродинамических процессов, протекающих в протяженных тупиковых выработках, проветриваемых за счёт эжекционного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки. В программном комплексе Ansys проведено вычислительное моделирование процессов воздухораспределения на сопряжении с тупиковой выработкой, имеющей продольную перегородку. Отражено изменение местного аэродинамического сопротивления при прямом и реверсивном режиме работы шахтной вентиляции. Проведена оценка изменения скорости воздуха в протяженной тупиковой выработке, при осуществлении регулирования путем изменения угла открытия подвижной створки продольной перегородки. На основании полученных результатов, в статье показано, что применение продольных перегородок позволяет проветривать протяженные тупиковые выработки без применения механической вентиляции, за счет возникающего эжекционного эффекта.

Ключевые слова: вентиляция, проветривание шахт, продольная перегородка, вычислительное моделирование, тупиковая выработка, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление

VENTILATION METHOD FOR LONG BLIND DRIFTS WITH LONGITUDINAL BAFFLES

Stanislav A. Pavlov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54, Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), office: +7 (383) 205 30 30 ext. 179), e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

The study focuses on aerodynamic processes in long blind drifts ventilated owing to ejection effect generated thanks to construction of longitudinal baffles. The numerical modeling of air distribution at the junction with a blind drift with a longitudinal baffle is implemented in ANSYS. The change in the local air drag in case of forward and reverse air flows is shown. The velocity variation in air flow in a long blind drift with adjustment of ventilation efficiency by alteration of the opening angle of the longitudinal baffle flap is estimated. Based on the obtained results, the author shows that construction of longitudinal baffles allows efficient ventilation in long blind drifts owing to the ejection effect, without forced ventilation arrangement.

Keywords: ventilation, mine ventilation, longitudinal baffle, computational modeling, blind drift, air flow rate, air drag

Введение

Забои в период проведения горных выработок образуют тупики, проветривание которых возможно только при помощи специальных устройств, позволяющих направлять часть воздуха сквозной струи в забои этих выработок [1-9].

Проветривание тупиковых выработок может осуществляться: за счет турбулентной диффузии, сжатым воздухом, при помощи вентиляторов местного проветривания (ВМП), за счет общешахтной депрессии. В некоторых случаях перечисленные способы комбинируются [10-13].

Согласно п. 154 ФНиП [14], за счет диффузии допускается проветривание тупиковых горных выработок длиной до 6 м при условии, что горные работы в них не ведутся.

Проветривание тупиковых выработок за счет непосредственного выпуска сжатого воздуха из воздухопровода неэффективно, так как при этом не обеспечивается быстрое очищение выработки по всей ее длине от вредных примесей. Кроме того, стоимость проветривания таких выработок будет очень высока [15].

На практике принято осуществлять проветривание тупиковых выработок при помощи ВМП. Поскольку в настоящее время это наиболее универсальный и надежный способ обеспечения подачи требуемого количества свежего воздуха в забой [16].

Из всех способов проветривания за счет общешахтной депрессии для тупиковых выработок большой длины наиболее приемлемы два: параллельными выработками и путем устройства продольной перегородки [10].

С целью поиска эффективных и экономичных способов проветривания тупиковых выработок без применения вентиляторов местного проветривания, рассмотрим вариант с применением продольной перегородки подробнее.

Методы

В п. 124 ФНиП [14] сказано, что в тупиковых горных выработках негазовых шахт, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, средняя по сечению скорость воздуха должна быть не менее 0,15 м/с. Максимально допустимые скорости воздуха в очистных и тупиковых горных выработках – не более 4 м/с.

Согласно п. 83 ФНиП [14] допускается проветривание тупиковой выработки за счет общешахтной депрессии с использованием продольных перегородок из воздухо непроницаемого материала длиной не более 60 м на шахтах не выше II категории.

Достоинства проветривания тупиковых выработок большой длины при использовании продольной перегородки за счет общешахтной депрессии: надежность проветривания в связи с отсутствием вентиляционного оборудования; наличие непрерывной дежательной струи воздуха в забое [10, 12].

В тоже время недостатками такого способа проветривания является: загромождение выработки, что затрудняет транспортирование горной массы и материалов, особенно при проведении выработок малого сечения; значительные утечки воздуха через перегородку в связи с большой площадью ее поверхности; большой расход строительных материалов на возведение перегородки; снижение скорости проходки вследствие затрат времени на возведение перегородки; высокая стоимость проветривания [10, 12]. Кроме того, применение продольных

перегородок существенно увеличивает аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

В настоящей работе рассматривается проветривание протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при обособленном применении продольной перегородки для одного из вариантов формирования глухого забоя. В общем виде, фрагмент исследуемого участка вентиляционной сети шахты представляет собой «колесо с нишей» (рис. 1). Все выработки исследуемой модели упрощены и имеют прямоугольное сечение с размерами сторон: 4,6 х 2,6 м. Длина тупиковой части выработки составляет 100 м. Рассмотрены варианты установки продольной перегородки у правого и левого бортов тупиковой выработки. Таким образом между перегородкой и ближайшем к ней бортом выработки образуется вентиляционный канал. Общим условием для расположения перегородки в выработке являлось следующее: один ее край, оснащенный подвижной створкой, устанавливается в потоке сквозной струи, а другой – вблизи груди забоя (рис. 1). Согласно п. 153 ФНиП [14], на негазовых шахтах допускается отставание продольной перегородки от груди забоя до 12 м. В представленной работе это расстояние было принято 4,6 м, кратно ширине выработки.

Расстояние от борта выработки до перегородки принято равным 0,6 м. Основным критерием выбора этого расстояния было сведение к минимуму помех передвижению самоходной техники. Поскольку применяемый парк техники в шахтах нашей страны обширен, то для заданного сечения и типа исследуемых выработок ограничимся размерами погрузочно-доставочной машины (ПДМ), как наиболее габаритной и часто применяемой при проходке. Анализ открытых источников показал, что для полноценной работы ПДМ, в среднем необходима ширина выработки от 4 м и более.

Из вышенаписанного следует, что обособленное применение продольной перегородки для проветривания забоя не значительно перекрывает проходное сечение сквозной выработки, и влияние на аэродинамическое сопротивление исследуемого участка остается минимальным.

На основании вычислительного моделирования проанализировано поле скоростей воздуха на исследуемом участке, сравнивалось аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка без продольной перегородки, так и с ее установкой вдоль борта тупиковой выработки.

Для удобства сравнения местные сопротивления переведены из вида «безразмерный коэффициент местного сопротивления» к виду «коэффициент аэродинамического сопротивления» с размерностью $1 k_{\mu} = 9,81 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ [17], при следующих параметрах воздуха: температуре – 20 °С, и атмосферном давлении – 101325 Па.

На основании литературных источников [17-21] можно аналитически рассчитать аэродинамическое сопротивление исследуемого участка. Согласно [10], аэродинамическое сопротивление исследуемого участка при нагнетательном способе проветривания составит $0,000647 k_{\mu}$, при всасывающем – $0,000539 k_{\mu}$.

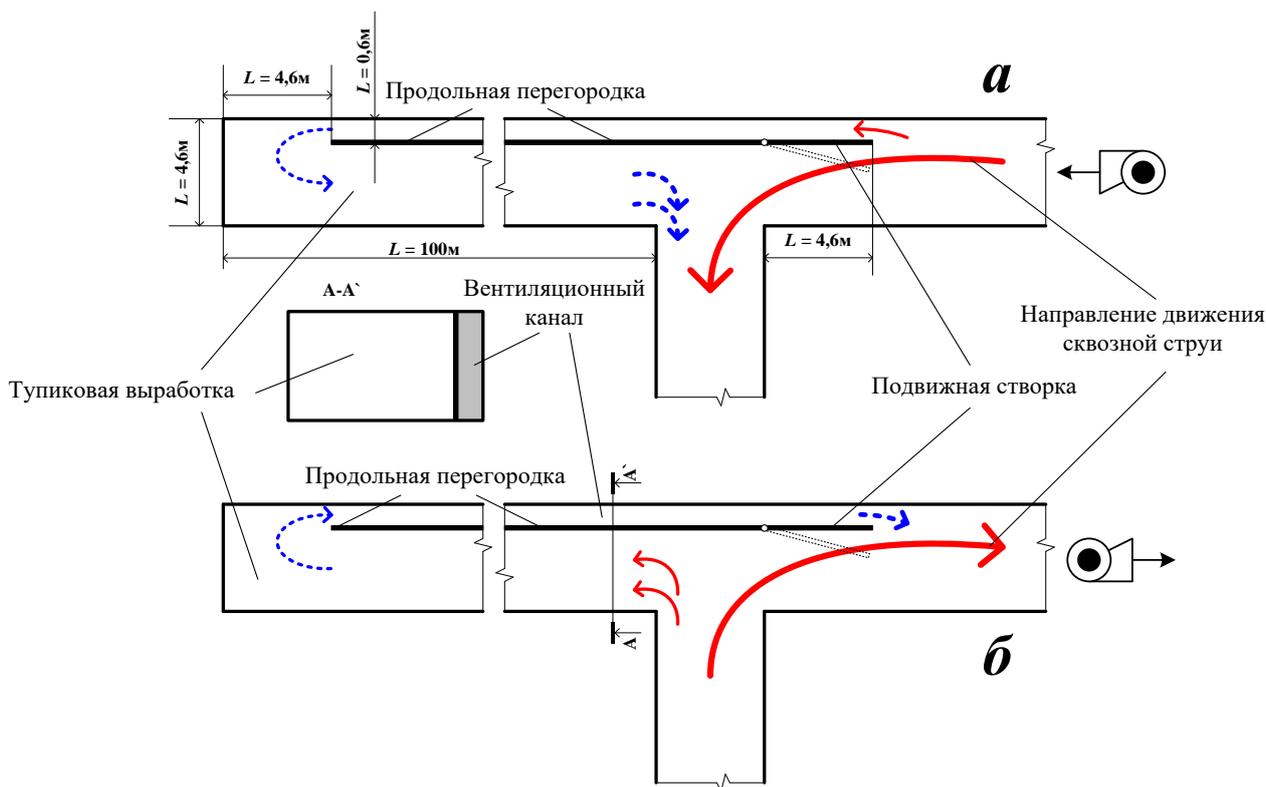


Рис. 1 Схема исследуемого участка вентиляционной сети:

а – при нагнетательном способе проветривания; *б* – при всасывающем способе проветривания. Красная стрелка – свежая струя воздуха; синяя стрелка – исходящая струя воздуха.

Поскольку дальнейшие исследования проводились в вычислительном комплексе Ansys CFX методом конечных объемов, было необходимо верифицировать полученные результаты [22-27]. Как уже отмечалось в работах [28, 29], исследование численной модели горных выработок методом конечных объемов показывает хорошую сходимость с результатами аналитических расчетов местных аэродинамических сопротивлений. Результаты вычислительного моделирования показали, что при нагнетательном способе проветривания аэродинамическое сопротивление исследуемого участка составит $0,000642\text{ км}$, при всасывающем – $0,000537\text{ км}$ (вариант 0, табл. 1). Как можно увидеть, расхождение результатов не превысило 0,4-0,8 %. Это позволяет доверительно относиться к последующим результатам исследования.

При моделировании воздухораспределения без применения продольной перегородки, для нагнетательного способа проветривания исследуемого участка, было выявлено, что за счет диффузии вихревые потоки воздуха проникают в тупиковую выработку на расстояние 10-12 м от ее устья. При всасывающем способе проветривания, за счет диффузии потоки воздуха из сквозной струи проникают в тупиковую выработку не более чем на 6 м от ее устья. В остальной части тупиковой выработки наблюдается зона застоя воздуха, где могут аккумулироваться вредные и ядовитые примеси. Поэтому, согласно ФНиП [14], при

отсутствии механической вентиляции подобные тупиковые выработки закрываются герметичными перемычками или сетчатым забором для предотвращения прохода в нее горнорабочих.

Результаты

Рассмотрим результаты расчета воздухораспределения (вариант 1, табл. 1) при установке продольной перегородки вдоль правого борта протяженной тупиковой выработки (рис. 2).

При нагнетательном способе проветривания (рис. 2а) в образовавшемся вентиляционном канале развивается средняя по сечению скорость воздуха 1 м/с. Поток воздуха перемещается по вентканалу до забоя, потом разворачивается и направляется по тупиковой выработке обратно к устью выработки. При этом в тупиковой выработке выполняется условие по скорости проветривания со средней по сечению скорости 0,15 м/с [14]. Установка продольной перегородки, в рассмотренном случае, увеличило аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 19 % и составило 0,000764 *кμ*.

На рис. 2б рассмотрено поле скоростей при всасывающем способе проветривания. Часть воздушного потока отделяется от сквозной струи, перемещается к груди забоя тупиковой выработки и через образовавшийся вентканал уходит на исходящую струю. При этом, через вентиляционный канал скорость воздуха составляет 3 м/с. Что позволяет проветривать тупиковую выработку со средней по сечению скоростью потока 0,5 м/с. Аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка увеличилось на 4 % по сравнению с вариантом без продольной перегородки и составило 0,000559 *кμ*.

Изменяя угол открытия подвижной створки (рис. 1), можно регулировать скорость воздуха, проходящего через образовавшийся вентиляционный канал, оказывая влияние на интенсивность проветривания тупиковой выработки.

Рассмотрим один из результатов расчета воздухораспределения при нагнетательном способе проветривания (вариант 2, табл. 1), когда подвижная створка отклонена на 1/4 ширины выработки, на 1,2 м (рис. 3а). Средняя скорость воздуха в вентканале увеличивается до 1,95 м/с. При этом тупиковая выработка проветривается со средней скоростью 0,3 м/с. Такое регулирование увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 49,3 %, которое достигает в этом варианте значения 0,000957 *кμ*.

Подобное открытие подвижной створки на 1/4 ширины выработки в случае всасывающего способа проветривания (рис. 3б), обеспечивает среднюю скорость воздуха в вентканале 2,9 м/с. Проветривание тупиковой выработки при этом осуществляется со средней по сечению скоростью воздуха 0,46 м/с. Открытие подвижной створки на 1/4 ширины выработки увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 18 %, которое в рассмотренном случае составит 0,000634 *кμ*.

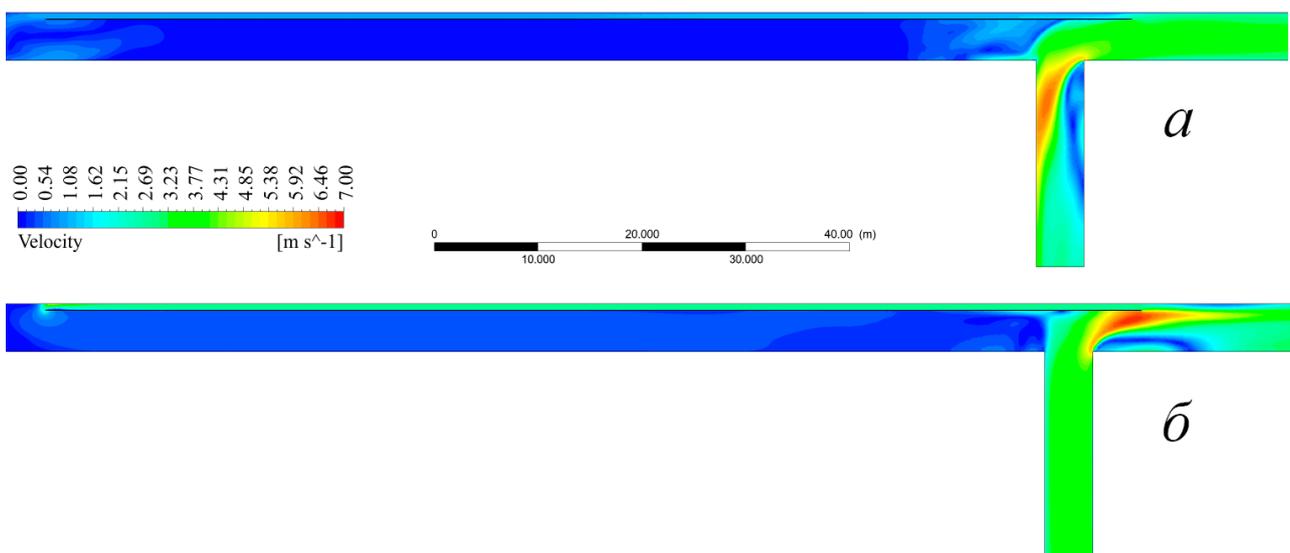


Рис. 2. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

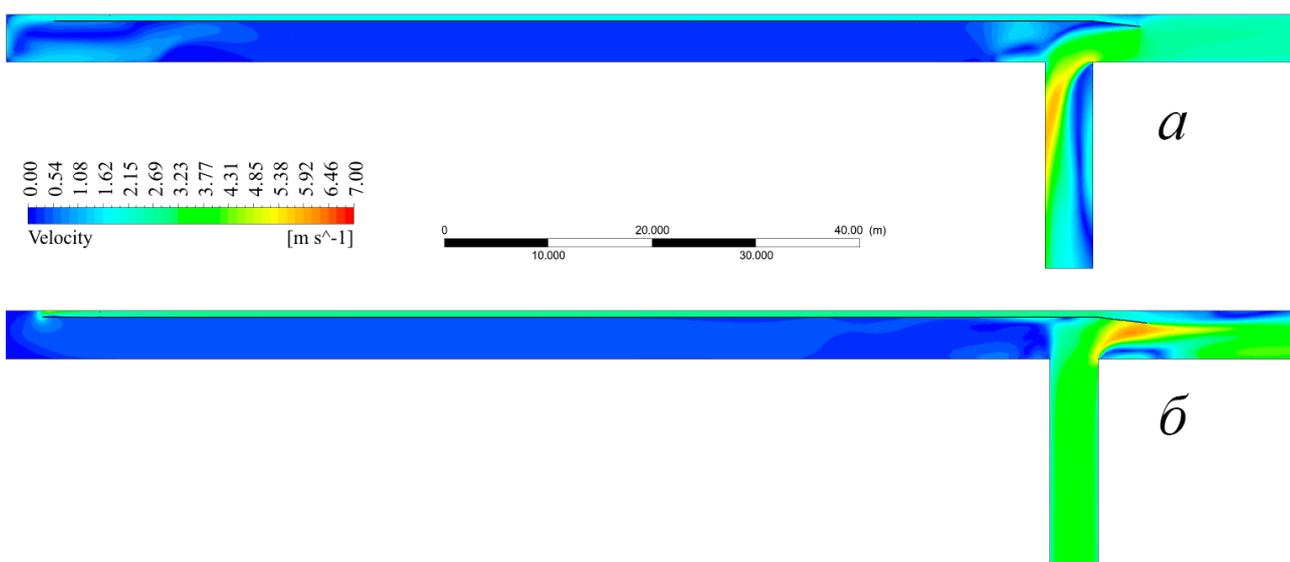


Рис. 3. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

Дальше рассмотрим вариант (вариант 3, табл. 1) с установкой продольной перегородки вдоль левого борта тупиковой выработки (рис. 4). Расстояние выступа продольной перегородки за пределы устья тупиковой выработки составляет 0,6 м, чтобы не создавать помех при маневрировании самоходной техники.

При нагнетательном способе проветривания (рис. 4а) в образовавшемся вентиляционном канале развивается средняя по сечению скорость воздуха 2,15 м/с. Тупиковая выработка в этом случае проветривается со средней по сечению скоростью потока 0,33 м/с. Такой вариант установки продольной

перегородки повысил аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 4,6 %, величина которого составила 0,000672 $k\mu$.

При реверсировании направления сквозной струи, когда применяется всасывающий способ проветривания (рис. 4б), средняя скорость воздуха в вентканале составит 0,9 м/с. Развиваемая скорость воздушного потока в тупиковой выработке, согласно полученным расчетам будет 0,13 м/с, что является ниже минимально допустимой. Кроме того, применение продольной перегородки, в рассмотренном случае, увеличивает аэродинамическое сопротивление исследуемого участка на 19,9 % и достигнет значения 0,000644 $k\mu$.

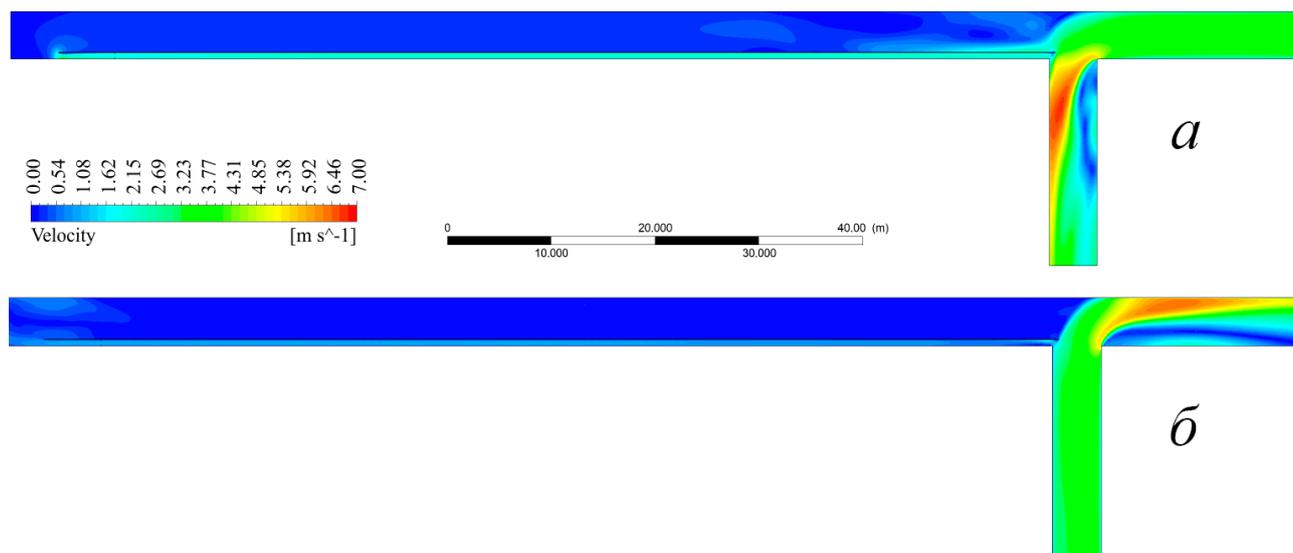


Рис. 4. Поле скоростей на исследуемом участке с установленной продольной перегородкой при нагнетательной (а) и всасывающей (б) схемах проветривания

Обсуждение

Как показали результаты проведенного исследования, обособленное применение продольных перегородок оказывает существенное влияние на аэродинамические процессы, возникающие в тупиковой выработке протяженностью до 100 м. В зависимости от направления движения сквозной струи, за счет возникающего эжекционного эффекта, тупиковая выработка может проветриваться с регламентированной скоростью потока воздуха. При этом существенно не повышая аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

Для удобства сравнения, отразим полученные результаты исследования в сводной таблице (таблица) и проанализируем их.

Сводная таблица результатов расчета аэродинамического сопротивления и средней скорости воздуха для рассмотренных вариантов установки продольной перегородки в тупиковой выработке

	Способ проветривания	Аэродин. сопр., <i>кμ</i>	Отношение аэродин. сопр., %	Скорость в вент. канале, м/с	Скорость в выработке, м/с
Аналитический расчет аэродин. сопр.	нагнетательный	0,000647	–	–	–
	всасывающий	0,000539	–	–	–
Вариант 0 (без прод. перегородки)	нагнетательный	0,000642	0,8	–	–
	всасывающий	0,000537	0,4	–	–
Вариант 1	нагнетательный	0,000764	19,0	1	0,15
	всасывающий	0,000559	4,0	3	0,50
Вариант 2	нагнетательный	0,000957	49,3	1,95	0,30
	всасывающий	0,000634	18,0	2,9	0,46
Вариант 3	нагнетательный	0,000672	4,6	2,15	0,33
	всасывающий	0,000644	19,9	0,9	0,13

Из результатов видно, что наиболее эффективными являются варианты: при всасывающем способе проветривания с установкой продольной перегородки у правого борта (вариант 1), а при нагнетательном – у левого борта (вариант 3). В этих вариантах наблюдаются максимальные расчетные скорости проветривания тупиковой выработки (0,33-0,5 м/с), при минимальном увеличении аэродинамического сопротивления (на 4-4,6 %) исследуемого участка.

Следует отметить, что проветривание тупиковой выработки при обособленной установке продольной перегородки в значительной степени зависит от постоянства величины скорости воздуха в сквозной струе. В случае применения указанного способа проветривания, тупиковая выработка обеспечивается минимально необходимым количеством воздуха для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточным для ведения горных работ. Поэтому, для проведения проходческих работ, необходимо проложить в вентканале вентиляционный трубопровод, подключенный к ВМП, который будет обеспечивать забой требуемым количеством воздуха. Продольная перегородка в этом случае будет интенсифицировать проветривание забоя совместно с ВМП, проветривать забой в пассивном режиме при его простое, за счет возникающего эжекционного эффекта, и обеспечивать дополнительную защиту вентиляционного трубопровода от механических повреждений при ведении горных работ.

Заключение

Применение продольных перегородок, позволяет проветривать протяженные тупиковые выработки без применения механической вентиляции, за счет возникающего эжекционного эффекта. При этом способе проветривания, в протяженной тупиковой выработке обеспечивается минимально требуемая скорость

воздушного потока, необходимая для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточным для ведения проходческих работ.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведённых в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко А.М., Никифоров Д.В., Ворошилов Я.С., Поморцев А.А. Анализ существующих способов проветривания тупиковых подготовительных выработок // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2009. № 2. С. 54–64.

2. О некоторых физических явлениях при вымывании вредностей из тупиковых выработок / Я.Д. Паршин // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. - Апатиты: АН СССР, 1977. - С.27.

3. Матросов, А.Ф. Исследования всасывающего способа проветривания тупиковых выработок / А.Ф. Матросов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. - Свердловск, 1974. - Вып. 92. - С.3-7.

4. Матросов, А.Ф. Исследование влияния разных факторов на коэффициент турбулентной диффузии и кратности обмена воздуха при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок / А.Ф. Матросов, А.Н. Корзон, В.А. Исаков // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. - Свердловск, 1976.- Вып. 98. - С.30-35.

5. Петухов, В.А. Определение коэффициента использования воздуха в забоях подготовительных выработок при различных способах проветривания / В.А. Петухов // Управление газовыделением в угольных шахтах: Сб. науч. тр. ВостНИИ. - Кемерово, 1979. - Т.31. - С.117-122.

6. Черечукин В.Г. Оценка эффективности вентиляции тупиковых выработок по фактору взрывобезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 10. С. 347–351.

7. Смирняков В.В., Мешков А.А. Особенности проветривания тупиковых выработок вентиляторами местного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 3. С. 69–77.

8. Смирняков В.В. Особенности расчета аэродинамического сопротивления тупиковых выработок большой длины и сложной конфигурации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 134–140.

9. Фельдман Э.П., Кирик Г.В., Стадник А.Д., Заполнение метаном тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 1. – С. 23 – 33.

10. Проветривание угольных шахт / Н.Ф. Кременчуцкий. - М. : ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1961. - 240 с.

11. Воздух в шахте : Трактат о проветривании угольных шахт / Ф. С. Клебанов; [Рос. акад. естеств. наук, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, Рос. угольная компания]. - М. : Изд. дом "Имидж", 1995. - 574 с.

12. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. – М.: Углетехиздат, 1959. – 632с.

13. Рудничная и промышленная аэрология / А.Ф. Милетич, И.М. Яровой, В.Н. Бойков. - М.: Недра, 1972. – 254 с.

14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" от 01 января 2021 года (Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года

№ 507)

15. Проветривание тупиковых выработок большой длины. / Г.В. Дуганов, В. Ф. Дребница, И.П. Никитин, А.В. Дребница. - М.: Изд-во «Недра», 1968, - 75с.
16. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н. Н. Мохирев, В. В. Радько. - М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2007. - 324 с.
17. Рудничная вентиляция: Справочник / Н.Ф. Гращенко, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др.; Под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. И доп. - М. : Недра, 1988. - 440 с.
18. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей / А.А. Харев. — М.: Углетехиздат, 1954. —248 с.
19. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. –672 с.: ил.
20. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха кн. 2. / Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. - М. : Стройиздат, 1992. - 416 с.
21. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. - М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. - 209 с.
22. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. -210 с
23. Электронное пособие ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.
24. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности: учебное пособие /Ю. И. Хлопков, В. А. Жаров, С. Л. Горелов. – М.: МФТИ, 2005. – 179 с.
25. Турбулентность: модели и подходы: курс лекций: 4.1 / П. Г. Фрик. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 108 с.
26. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP , Inc.
27. Габарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
28. Павлов С. А. Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2019. – №2. Т.6. 207-211.
29. Павлов С.А. Оценка изменения величины местных аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети рудника при реверсивном режиме работы системы вентиляции // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2019. – Том 2, № 4. – С. 212-219.

© С. А. Павлов, 2021