



**ПРОВЕТРИВАНИЕ ПРИЗАБОЙНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРОТЯЖЕННОЙ
ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ЭЖЕКЦИОННОГО ЭФФЕКТА,
ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ УСТАНОВКЕ ПРОДОЛЬНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ**

С. А. Павлов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: pavlov_s_a@inbox.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Приведены результаты исследования аэродинамических процессов, протекающих в протяженных тупиковых выработках. Отражено изменение местного аэродинамического сопротивления исследуемого участка при нагнетательном и всасывающем режиме работы шахтной вентиляции. На основании результатов вычислительного моделирования показано, что использование обособленно установленных продольных перегородок позволяет проветривать тупиковые выработки (до 100 м) без применения местной механической вентиляции за счет возникающего эжекционного эффекта.

Вентиляция, проветривание шахт, продольная перегородка, вычислительное моделирование, тупиковая выработка, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление

**VENTILATION OF BOTTOMHOLE AREA OF AN EXTENDED BLIND DRIFT DUE
TO THE EJECTION EFFECT ARISING WHEN A LONGITUDINAL PARTITION IS INSTALLED**

S. A. Pavlov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: pavlov_s_a@inbox.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of studying aerodynamic processes taking place in extended blind drifts are presented. The change in local aerodynamic resistance of area under study is shown at the supply and suction modes of mine ventilation. Based on the results of computational modeling, it is shown that separately installed longitudinal partitions allow ventilating blind drifts (up to 100 m) without using local mechanical ventilation due to the resulting ejection effect.

Ventilation, mine ventilation, longitudinal partition, computational modeling, blind drift, air flow rate, aerodynamic resistance

При проходке горных выработок образуются тупики, проветривание которых возможно только с использованием специальных устройств, позволяющих направлять часть воздуха сквозной струи в забои этих выработок [1–5]. Проветривание тупиковых выработок осуществляется в основном следующими способами: за счет турбулентной диффузии при помощи вентиляторов местного проветривания (ВМП) и за счет общешахтной депрессии. В некоторых случаях эти способы комбинируются [6, 7]. Согласно п. 154 ФНиП [8] за счет диффузии допускается проветривание тупиковых горных выработок длиной до 6 м при условии, что горные работы в них не ведутся.

В настоящее время принято осуществлять проветривание тупиковых выработок при помощи вентиляционных трубопроводов, подключенных к ВМП, поскольку это наиболее универсальный и надежный способ подачи требуемого количества свежего воздуха в забой и рабочую зону. ВМП работают без остановки на протяжении всех технологических процессов при проходке подготовительной выработки. Это прописано в федеральных нормах [8], об этом говорит

здравый смысл, поскольку в непроветриваемой выработке сразу же начинают скапливаться вредные и ядовитые примеси из рудничной атмосферы, опасные для горнорабочих. [9]. Поэтому исследования способов проветривания тупиковых выработок, направленные на снижение нагрузки на ВМП, являются весьма актуальными.

Из всех способов проветривания за счет общешахтной депрессии для тупиковых выработок большой длины наиболее приемлемы два — параллельными выработками и путем устройства продольной перегородки [6]. В п. 124 ФНиП [8] отмечено, 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 должны превышать 4 м/с. Согласно п. 83 ФНиП [8] 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.

Достоинствами проветривания тупиковых выработок большой длины с продольной перегородкой за счет общешахтной депрессии являются надежность проветривания в связи с отсутствием вентиляционного оборудования и наличие непрерывной дежательной струи воздуха в забое [6, 7]. К недостаткам можно отнести 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 [6, 7]. Кроме того, применение продольных перегородок существенно увеличивает аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

Расчетная модель и методы исследования. В работе рассматривается проветривание протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при обособленном применении продольной перегородки для основных вариантов формирования глухого забоя с боковым и продольным примыканием к сквозной выработке (рис. 1в, г). В общем виде фрагменты исследуемых участков вентиляционной сети шахты представляют собой “прямой канал с локальным расширением” (рис. 1в) и “колесо с нишей” (рис. 1г). Все выработки исследуемой модели упрощены и имеют прямоугольное сечение 4.6×2.6 м. Длина тупиковой части выработки составляет 100 м. Проанализируем варианты установки продольной перегородки у правого и левого бортов тупиковой выработки. Таким образом между перегородкой и ближайшим к ней бортом выработки образуется отгороженный вентиляционный канал. Общим условием для расположения перегородки в выработке являлось то, что один ее край устанавливается в потоке сквозной струи, а другой — вблизи груди забоя. Согласно п. 153 ФНиП [8] на негазовых шахтах допускается отставание продольной перегородки от груди забоя до 12 м. В данной работе это расстояние 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. Из открытых научных источников следует, что для полноценной работы ПДМ в среднем необходима ширина выработки от 4 м и более.

На основании результатов вычислительного моделирования проанализировано поле скоростей воздуха на исследуемом участке, сравнивалось аэродинамическое сопротивление участка без продольной перегородки 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 $1 \text{ км} = 9.81 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ [10] при температуре 18°C и атмосферном давлении 101325 Па .

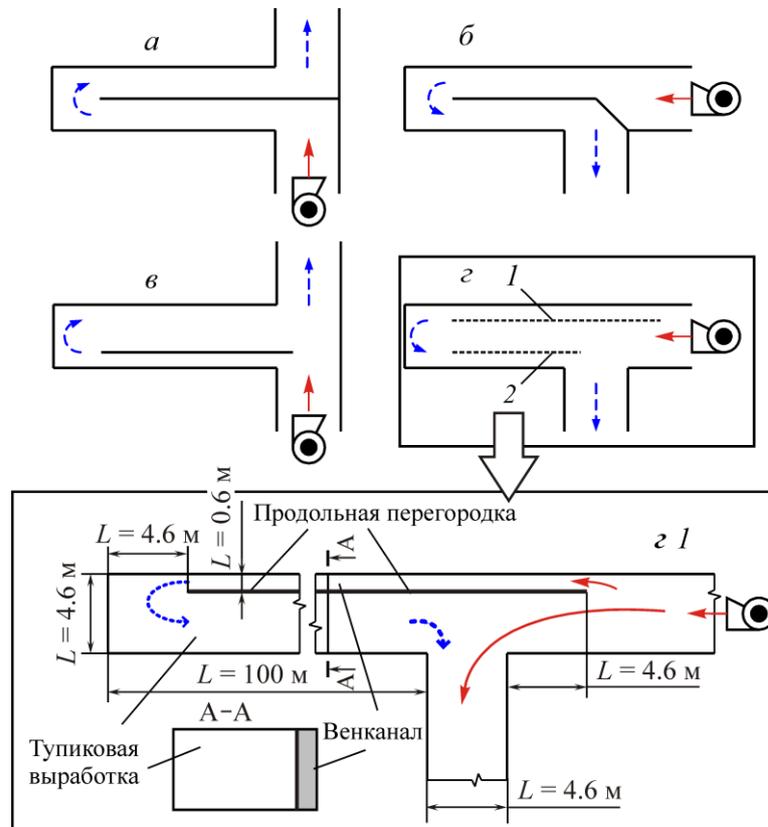


Рис. 1. Схема участка вентиляционной сети с “классической” (а, б) и обособленной (в, г) установкой продольной перегородки: а, в — при боковом примыкании тупиковой выработки к сквозной; б, г — при продольном; 1 — установка продольной перегородки вдоль правого борта выработки; 2 — вдоль левого (красная стрелка — свежая струя воздуха; синяя — исходящая)

На основании работ [10, 11] можно аналитически рассчитать аэродинамическое сопротивление участка. Согласно [11] для продольного примыкания тупиковой выработки аэродинамическое сопротивление исследуемого участка при нагнетательном способе проветривания составит 0.000647 км , при всасывающем — 0.000539 км . При боковом примыкании для нагнетательного и всасывающего способов проветривания оно будет одинаково — 0.000099 км .

Поскольку дальнейшие исследования проводились в вычислительном комплексе Ansys CFX [12, 13] методом конечных объемов, необходимо было верифицировать полученные результаты. Как отмечалось в работах [14, 15], исследование численной модели горных выработок методом конечных объемов показывает хорошую сходимость с результатами аналитических расчетов местных аэродинамических сопротивлений. Результаты вычислительного моделирования для продольного примыкания тупиковой выработки показали, что при нагнетательном способе проветривания аэродинамическое сопротивление исследуемого участка составило 0.000642 км , при всасывающем — 0.000537 км . При боковом примыкании тупиковой выработки оно составило 0.000101 км . Отклонение не превысило $0.4\text{--}0.8\%$, что позволяет доверительно относиться к последующим результатам исследования.

Результаты. Проанализируем два варианта тупиковых выработок, оснащенных продольной перегородкой в “классическом исполнении” (рис. 1а, б). Площадь сквозной выработки при приближении к участку с продольной перегородкой снижается в два раза. Расстояние, которое необходимо преодолеть потоку воздуха, увеличится двукратно относительно длины тупиковой

выработки. Поверхность бортов выработки и самой перегородки с крупной шероховатостью также окажут влияние на рост величины аэродинамического сопротивления. Рассмотрим величины аэродинамического сопротивления для осредненного варианта с шероховатостью бортов выработки 10 мм и стенок перегородки (соответствующей шероховатости сухой деревянной доски) 0.1 мм. Для продольного примыкания тупиковой выработки при нагнетательном способе проветривания аэродинамическое сопротивление исследуемого участка составит 0.009065 кр, при всасывающем — 0.009561 кр. При боковом примыкании тупиковой выработки оно составит 0.010506 кр. Сравнение этих значений с вариантами, представленными ранее, показывает, что установка продольной перегородки для проветривания тупиковой выработки длиной 100 м увеличивает сопротивление исследуемого участка на 1–2 порядка. В этом случае для обеспечения в рабочей зоне требуемого воздухообмена следует дополнительно повысить давления ГВУ на 20–25 даПа. Поскольку в шахте, как правило, одновременно разрабатывается несколько подобных участков, такое увеличение нагрузки на ГВУ является существенным.

Далее рассмотрим применение обособленной установки продольной перегородки в тупиковой выработке для выполнения требования п. 124 ФНиП [8] относительно минимальной скорости воздуха не менее 0.15 м/с. Количество воздуха, поступающего к груди забоя тупиковой выработки в этом случае, находится в зависимости от скорости воздуха сквозной струи. Поэтому ограничимся диапазоном допустимых скоростей воздуха в горных выработках 1–6 м/с. Оценивать будем среднюю скорость по сечению тупиковой выработки без учета отгороженного вентиляционного канала (рис. 1).

Для удобства сравнения полученные результаты исследования представлены в сводной таблице, зависимости скоростей в сквозной струе и тупиковой выработке — на рис. 2.

Значения аэродинамических сопротивлений исследуемого участка, скоростей воздуха в сквозной и тупиковой выработках при нагнетательном и всасывающем способах проветривания для различных вариантов

Скорость воздуха в сквозной струе, м/с	Нагнетательный способ		Всасывающий способ	
	Скорость воздуха в тупиковой выработке, м/с	Аэродинамическое сопротивление исследуемого участка, кр	Скорость воздуха в тупиковой выработке, м/с	Аэродинамическое сопротивление исследуемого участка, кр
Продольное примыкание тупиковой выработки и обособленная установка продольной перегородки справа				
1	0.06	0.000789	0.11	0.000599
2	0.12	0.000748	0.23	0.000581
3	0.19	0.000725	0.36	0.000571
4	0.26	0.000712	0.49	0.000550
5	0.33	0.000692	0.62	0.000544
6	0.40	0.000674	0.75	0.000541
Продольное примыкание тупиковой выработки и обособленная установка продольной перегородки слева				
1	0.09	0.000706	0.03	0.000539
2	0.19	0.000691	0.07	0.000522
3	0.30	0.000677	0.12	0.000512
4	0.39	0.000660	0.16	0.000505
5	0.50	0.000661	0.21	0.000498
6	0.59	0.000645	0.25	0.000494
Боковое примыкание тупиковой выработки и обособленная установка продольной перегородки слева				
1	0.09	0.000291	0.07	0.000256
2	0.18	0.000283	0.14	0.000248
3	0.28	0.000280	0.22	0.000244
4	0.38	0.000277	0.29	0.000241
5	0.48	0.000275	0.37	0.000239
6	0.59	0.000273	0.44	0.000237

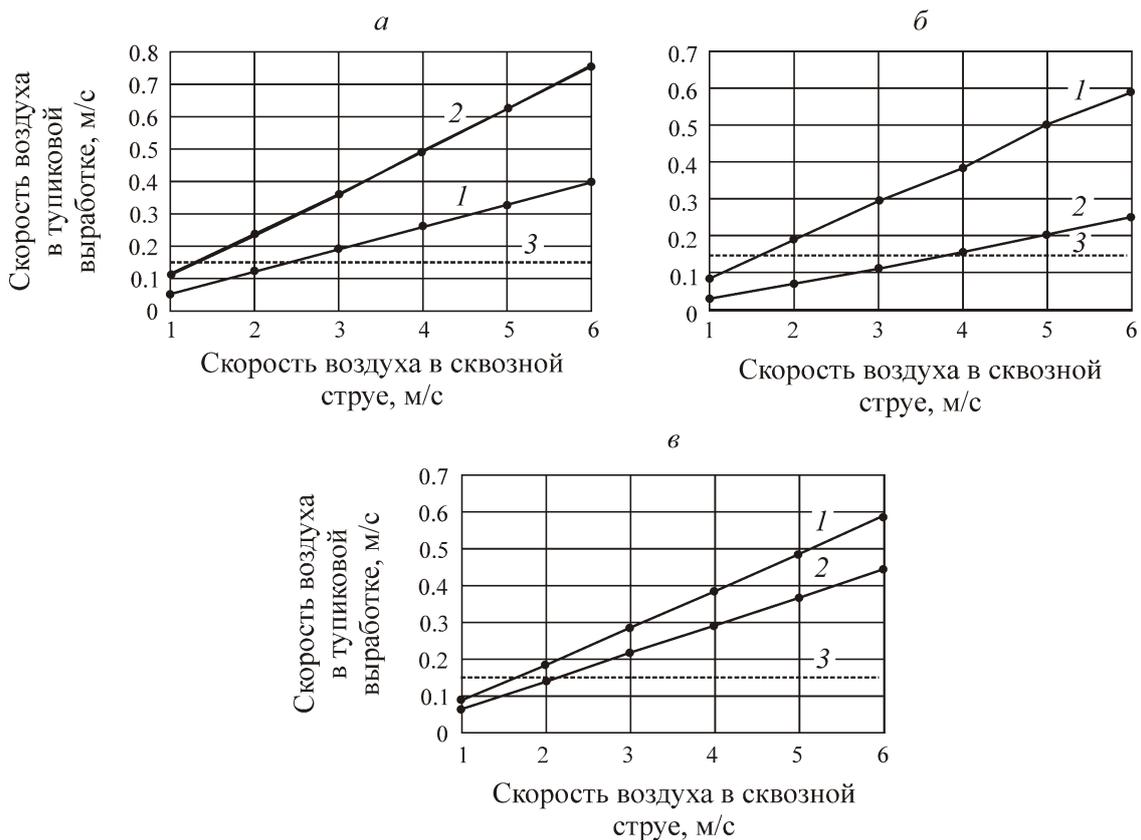


Рис. 2. Изменение скоростей воздуха: *a* — для продольного примыкания тупиковой выработки и обособленной установки продольной перегородки справа, *б* — для продольного примыкания тупиковой выработки и обособленной установки продольной перегородки слева; *в* — для бокового примыкания тупиковой выработки и обособленной установки продольной перегородки слева (*1* — нагнетательный способ проветривания; *2* — всасывающий способ проветривания; *3* — минимально допустимая скорость воздуха в тупиковой выработке)

Видно, что для продольного примыкания тупиковой выработки наиболее эффективными являются варианты: всасывающий способ проветривания с обособленной установкой продольной перегородки у правого борта (рис. 2*a*), нагнетательный — у левого (рис. 2*б*), для бокового примыкания тупиковой выработки — нагнетательный способ проветривания при обособленной установке продольной перегородки вдоль левого борта тупиковой выработки (рис. 2*в*).

Проведенные исследования показывают, что обособленное применение продольных перегородок существенно влияет 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, существенно не повышая аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети.

Следует отметить, что проветривание тупиковой выработки при обособленной установке продольной перегородки в значительной степени зависит от постоянства величины скорости воздуха в сквозной струе. При использовании такого способа проветривания, тупиковая выработка обеспечивается минимально необходимым количеством воздуха для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточным для ведения горных работ с применением самоходной дизельной техники. Поэтому для проведения проходческих работ требуется проложить в вентканале вентиляционный трубопровод, подключенный к ВМП, который будет компенсировать забой недостающим количеством воздуха. Продольная перегородка в этом случае за счет возникаю-

щего эжекционного эффекта снизит нагрузку на ВМП, будет проветривать забой в пассивном режиме при его простое и обеспечивать дополнительную защиту вентиляционного трубопровода от механических повреждений при ведении горных работ.

ВЫВОДЫ

Использование обособленно установленных продольных перегородок позволяет проветривать протяженные тупиковые выработки без применения местной механической вентиляции за счет возникающего эжекционного эффекта, несущественно изменяя аэродинамическое сопротивление участка вентиляционной сети шахты. При этом в протяженной тупиковой выработке обеспечивается минимально необходимая скорость воздушного потока, которая требуется для пребывания в ней горнорабочих, но недостаточная для ведения полноценных проходческих работ с применением самоходной дизельной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Timoshenko A. M., Nikiforov D. V., Voroshilov Ya. S., and Pomortsev A. A.** Analysis of existing methods of ventilation of dead-end preparatory workings, *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry*, 2009, no. 2, pp. 54–64. (in Russian) [**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. **Cherechukin V. G.** Evaluation of the ventilation efficiency of dead-end workings by the explosion safety factor, *Mining information and analytical bulletin*, 201, no. 1, pp. 347–351. (in Russian) [**Черечукин В. Г.** Оценка эффективности вентиляции тупиковых выработок по фактору взрывобезопасности // ГИАБ. — 2016. — № 10. — С. 347–351.]
3. **Smirnyakov V. V. and Meshkov A. A.** Features of ventilation of dead-end workings by local ventilation valves, *Mining information and analytical Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 69–77. (in Russian) [**Смирняков В. В., Мешков А. А.** Особенности проветривания тупиковых выработок вентиляторами местного проветривания // ГИАБ. — 2014. — № 3. — С. 69–77.]
4. **Smirnyakov V. V.** Features of calculating the aerodynamic resistance of dead-end roads of large length and complex configuration, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. 7, pp. 134–140. (in Russian) [**Смирняков В. В.** Особенности расчета аэродинамического сопротивления тупиковых выработок большой длины и сложной конфигурации // ГИАБ. — 2015. — № 7. — С. 134–140.]
5. **Feldman E. P., Kirik G. V., and Stadnik A. D.** Filling of dead-end coal mine workings with methane at the termination of their ventilation, *Journal of Mining Science*, 2011, no. 1, pp. 23–33. (in Russian) [**Фельдман Э. П., Кирик Г. В., Стадник А. Д.** Заполнение метаном тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания // ФТПРПИ. — 2011. — № 1. — С. 23–33.]
6. **Kremenchutsky N. F.** Ventilation of coal mines, Moscow, Gosgortehizdat, 1961, 240 pp. (in Russian) [**Кременчуцкий Н. Ф.** Проветривание угольных шахт. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 240 с.]
7. **Skochinsky A. A. and Komarov V. B.** Mine ventilation, Moscow, Ugletekhizdat, 1959. (in Russian) [**Скочинский А. А., Комаров В. Б.** Рудничная вентиляция. — М.: Углетехиздат, 1959. — 632 с.]
8. **Federal Norms and Rules in the field of industrial Safety “Safety Rules in Coal Mines”** dated January 01, 2021 (Approved by Order no. 507 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated December 8, 2020) (in Russian) [**Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности в угольных шахтах”** от 01 января 2021 г. – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 507)].

9. **Mohirev N. N. and Radko V. V.** Engineering calculations of mine ventilation. Building. Reconstruction. Operation, Moscow, LLC Nedra-Business Center, 2007, 324 pp.(in Russian) [**Мохирев Н. Н., Радько В. В.** Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2007. — 324 с.]
10. **Mine ventilation.** A reference book ed. K. Z. Ushakov, Moscow, Nedra, 1988, 440 pp. (in Russian) [**Рудничная вентиляция** / Справочник под ред. К. З. Ушакова. — М.: Недра, 1988. — 440 с.]
11. **Idelchik I. E.** Handbook of hydraulic resistance, ed. M. O. Steinberg, Moscow, Mashinostroenie, 1992, 672 pp. (in Russian) [**Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.]
12. **ANSYS.** Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.
13. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide.** Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP, Inc.
14. **Pavlov S. A.** On the change in the aerodynamic resistance of the ventilation network of the mine during the reversal of the air flow, Fundamental and Applied Mining Science, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 207–211. (in Russian) [**Павлов С. А.** Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 207–211.]
15. **Pavlov S. A.** Estimation of changes in the value of local aerodynamic resistances of the elements of the mine ventilation network during the reverse operation of the ventilation system, Interexpo Geo-Siberia, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 212–219. (in Russian) [**Павлов С. А.** Оценка изменения величины местных аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети рудника при реверсивном режиме работы системы вентиляции // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 212–219.]