

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.253.35

DOI:10.7242/echo.2024.2.11

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЙ К РЕВЕРСИВНОМУ РЕЖИМУ ПРОВЕТРИВАНИЯ НА РУДНИКАХ

К.М. Агеева, А.В. Зайцев, М.А. Семин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Правила безопасности предъявляют ряд требований к реверсивному режиму проветривания на шахтах и рудниках. В частности, п. 176 «Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» гласит о необходимости обеспечения расхода воздуха, проходящего по главным выработкам в реверсивном режиме проветривания, равного не менее 60 % от расхода воздуха, проходящего по ним в нормальном режиме. Однако требование п. 176 не в полной мере соответствует существующим требованиям по обеспечению предельно-допустимых концентраций горючих газов в горных выработках шахт и рудников. Кроме того, в условиях возрастания мощности добычи полезных ископаемых горнодобывающими предприятиями, вентиляционные сети рудников становятся более протяженными и разветвленными, что приводит к усложнению прогнозирования в них воздухораспределения как в нормальном, так и в реверсивном режимах проветривания. При реверсировании воздушной струи в аварийных ситуациях на таких рудниках важно прогнозировать влияние непредвиденных аэродинамических факторов, связанных с такими событиями, как возникновение тепловых и газовых депрессий, самопроизвольное открытие вентиляционных перемычек. По мнению авторов, перспективным подходом, позволяющим сделать такой прогноз, является анализ устойчивости движения воздушной струи в главных выработках.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, реверсивный режим проветривания, главная вентиляционная установка, предельно-допустимая концентрация, устойчивость движения воздушной струи.

Согласно п. 176 «Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1] перевод вентиляторных установок на реверсивный режим работы должен выполняться не более чем за 10 минут. Расход воздуха, проходящего по главным выработкам в реверсивном режиме проветривания, должен составлять не менее 60 % от расхода воздуха, проходящего по ним в нормальном режиме. Аналогичные требования представлены в Правилах безопасности [2] для угольных шахт. Так, п. 143 [2] гласит: «Расход воздуха в реверсивном режиме проветривания, проходящего по горным выработкам при авариях, в которых ПЛА предусмотрено реверсирование вентиляционной струи, должен составлять не менее 60 % расхода воздуха, проходящего по ним при нормальном режиме проветривания». Данное требование к количеству воздуха в реверсивном режиме проветривания для угольных шахт сформулировано исходя из требования отсутствия превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по метану и основано на следующих рассуждениях.

В нормальном режиме проветривания расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) для вентиляции длинного очистного забоя угольной шахты по фактору выделения метана или углекислого газа определяется по формуле [3]:

$$Q_{\text{н}} = \frac{1,67 \cdot l_{\text{д}}}{(C_{\text{н}} - C_0)}, \quad (1)$$

где  $l_d$  – выделение газа в лаву,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $C_n$  – максимально допустимая концентрация газа в исходящей струе из очистного забоя в нормальном режиме проветривания, %;  $C_0$  – концентрация газа в струе, поступающей в очистной забой, %.

Выразив из предложенной формулы максимально допустимую концентрацию газа в нормальном режиме проветривания в струе, исходящей из очистного забоя, получим следующую зависимость:

$$C_n = \frac{1,67 \cdot l_d}{Q_n} + C_0. \quad (2)$$

Согласно [4], при задействовании реверсивного режима проветривания, воздух, уже прошедший очистные выработки и содержащий некоторое количество газа, возвращается в очистной забой и вновь обогащается газом.

При задействовании реверсивного режима проветривания концентрация газа в воздушной струе, исходящей из очистного забоя, при задействовании реверсивного режима проветривания может быть найдена по следующей формуле:

$$C_p = \frac{1,67 \cdot l_d}{Q_p} + C_n, \quad (3)$$

где  $C_p$  – максимально допустимая концентрация газа в струе, исходящей из очистного забоя, в реверсивном режиме проветривания, %;  $Q_p$  – требуемый расход воздуха для вентиляции длинного очистного забоя в реверсивном режиме проветривания,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; а расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) для вентиляции длинного очистного забоя по фактору выделения метана или углекислого газа при реверсировании воздушной струи может быть определен по формуле:

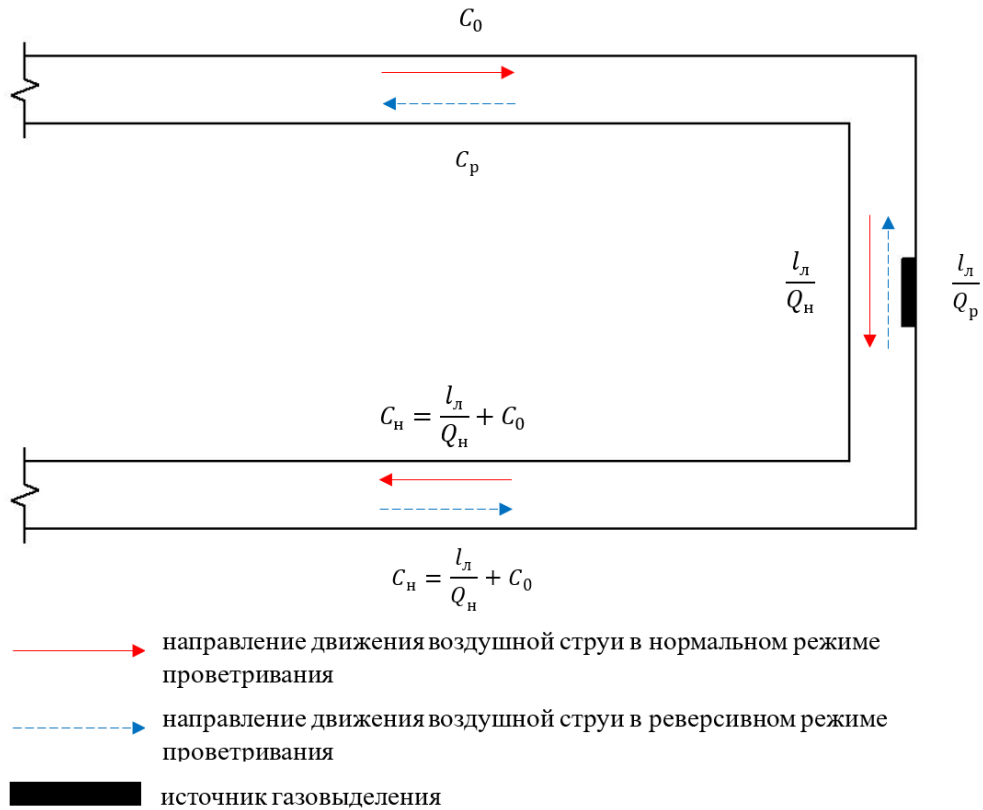
$$Q_p = \frac{1,67 \cdot l_d}{(C_p - C_n)}. \quad (4)$$

Поделив уравнение (4) на уравнение (1), получаем соотношение для расходов воздуха на главных вентиляционных выработках в реверсивном и нормальном режимах проветривания:

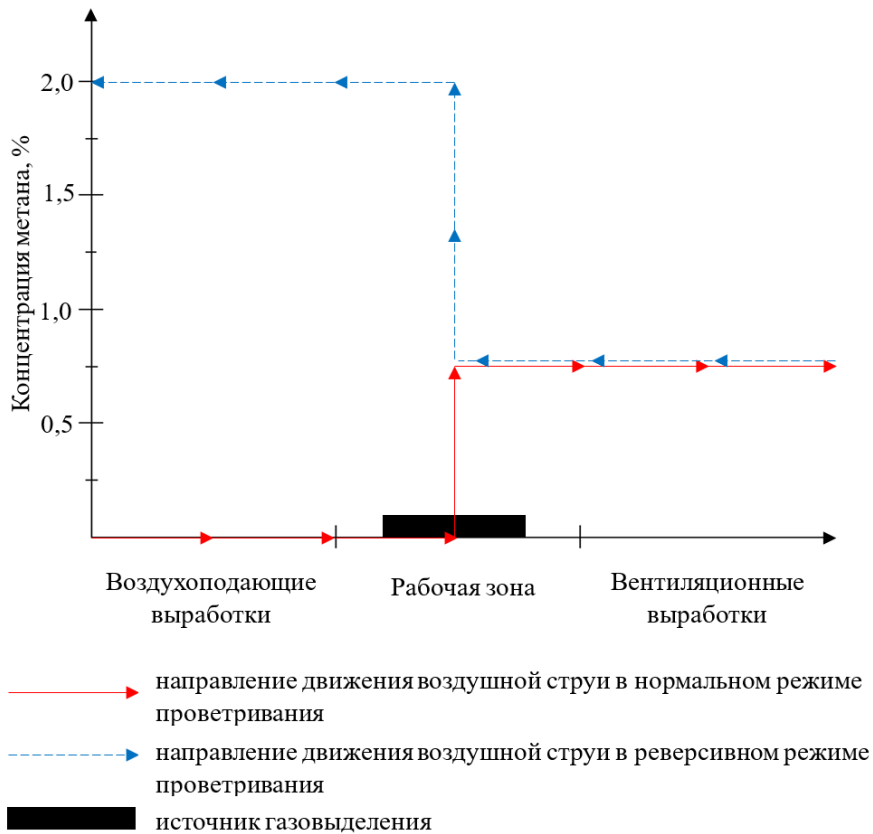
$$\frac{Q_p}{Q_n} = \frac{C_n - C_0}{C_p - C_n}. \quad (5)$$

На рисунке 1 представлено изменение концентрации газа в воздушной струе в процессе ее движения по горным выработкам при проветривании длинного очистного забоя в нормальном и реверсивном режимах.

Согласно п. 122 [2], максимальная концентрация метана в воздушной струе, исходящей из крыла, шахты в нормальном режиме проветривания не должна превышать 0,75 % ( $C_n = 0,75$  %). В современных Правилах безопасности [2] нет специальных указаний о предельных концентрациях метана в воздушной струе в реверсивных режимах проветривания на угольных шахтах, однако в п. 223 Правил безопасности, утвержденных в 1994 году [5], указывалось, что в течение периода реверсирования воздушной струи содержание метана в выработках, проветриваемых за счет общешахтной депрессии (компрессии), не должно превышать 2 % ( $C_p = 2$  %). Также указание на содержание метана, равное 2 %, присутствует в работе [4]. Подставляя указанные величины в уравнение (5), и считая, что концентрация газа в струе, поступающей в очистной забой, равна нулю ( $C_0 = 0$  %), получаем требуемое Правилами безопасности соотношение расходов воздуха в реверсивном и нормальном режимах проветривания на главных вентиляционных выработках направлений (крыльев), равное 0,6.



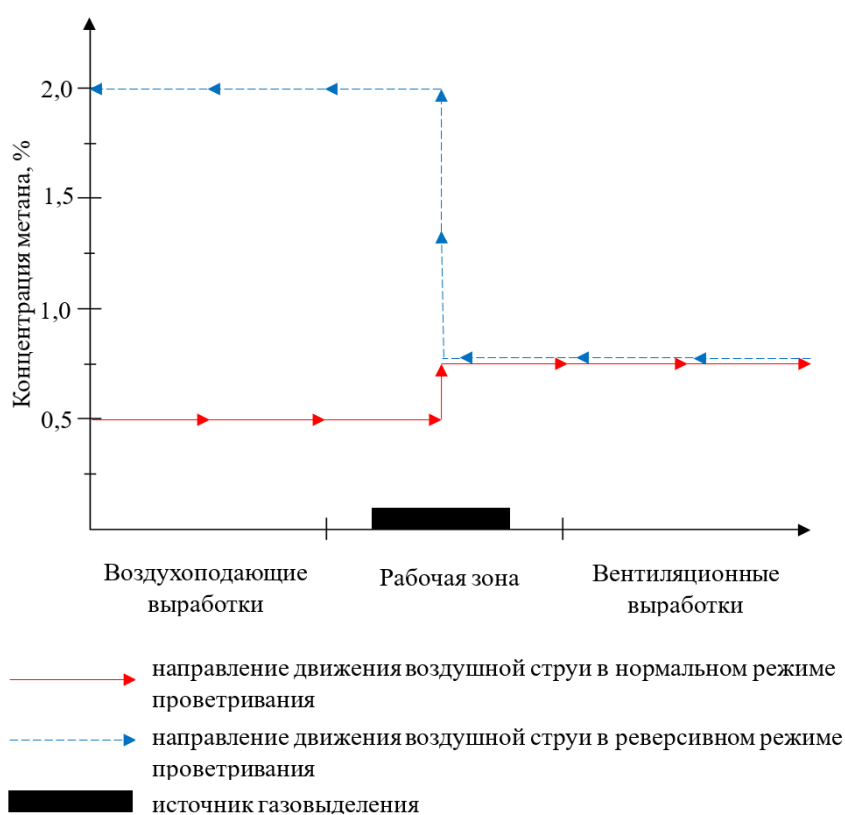
**Рис. 1.** Изменение концентрации газа в воздушной струе в процессе ее движения по горным выработкам при проветривании длинного очистного забоя в нормальном и реверсивном режимах



**Рис. 2.** График изменения концентрации газа в воздушной струе в условиях угольной шахты при  $c_0 = 0\%$

Однако, если принимать, что концентрация газа в струе, поступающей в очистной забой, равна предельно допустимому значению 0,5 % согласно п. 122 Правил безопасности [2] ( $c_0 = 0,5 \%$ ), получаем соотношение расходов воздуха в реверсивном и нормальном режимах проветривания на главных вентиляционных выработках направлений (крыльев), равное 0,2 или 20 %. Данная величина в три раза ниже, чем регламентируемые 60 %. Уменьшение требуемого количества воздуха в реверсивном режиме проветривания в данном случае в сравнении со случаем, описанным выше, связано с уменьшением количества выделения газа в лаву, поскольку при изменившихся концентрациях газа в струе, поступающей в очистной забой, концентрации метана в воздушной струе, исходящей из крыла, приняты одинаковыми.

Кроме того, задействование реверсивного режима проветривания при возникновении пожара в угольной шахте может привести к увеличению выделения метана в лаве, что не позволяет предсказать изменение концентрации метана в выработке [6, 7].



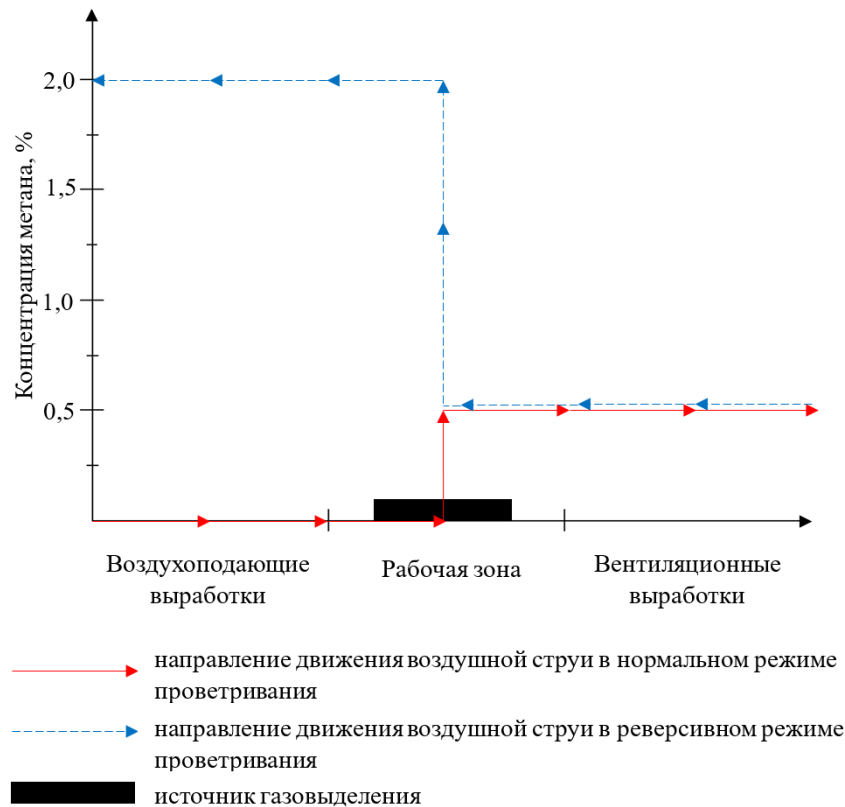
**Рис. 3.** График изменения концентрации газа в воздушной струе в условиях угольной шахты при  $c_0 = 0,5 \%$

Требование по обеспечению расхода воздуха в главных выработках в реверсивном режиме, в количестве 60 % от расхода воздуха в нормальном режиме проветривания, также применяется на рудниках, разрабатывающих месторождения калийно-магниевых, полиметаллических и других руд.

При этом п. 151 «Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1] предъявляет следующие требования к концентрации газов в струе, поступающей в рабочую зону при разработке рудных месторождений подземным способом: «Суммарное содержание горючих газов метана и водорода в выработках не должно превышать 0,5 % по объему. А содержание метана на объектах, на которых установлен «газовый режим» – 1 %». В «Правилах безопасности...» [1] от-

существуют специальные указания о предельных концентрациях метана в реверсивных режимах проветривания.

Приняв, для данного случая, что концентрация газа в струе, поступающей в очистной забой, равна нулю ( $c_0 = 0\%$ ), а в исходящей из крыла, шахты струе воздуха в нормальном режиме проветривания —  $0,5\%$  ( $c_n = 0,5\%$ ), при этом, в связи с отсутствием требований в Правилах безопасности, содержание метана в выработках в реверсивном режиме проветривания считать равным  $2\%$  ( $c_p = 2\%$ ), получим значение соотношения расходов воздуха (5), равное  $0,33$ .

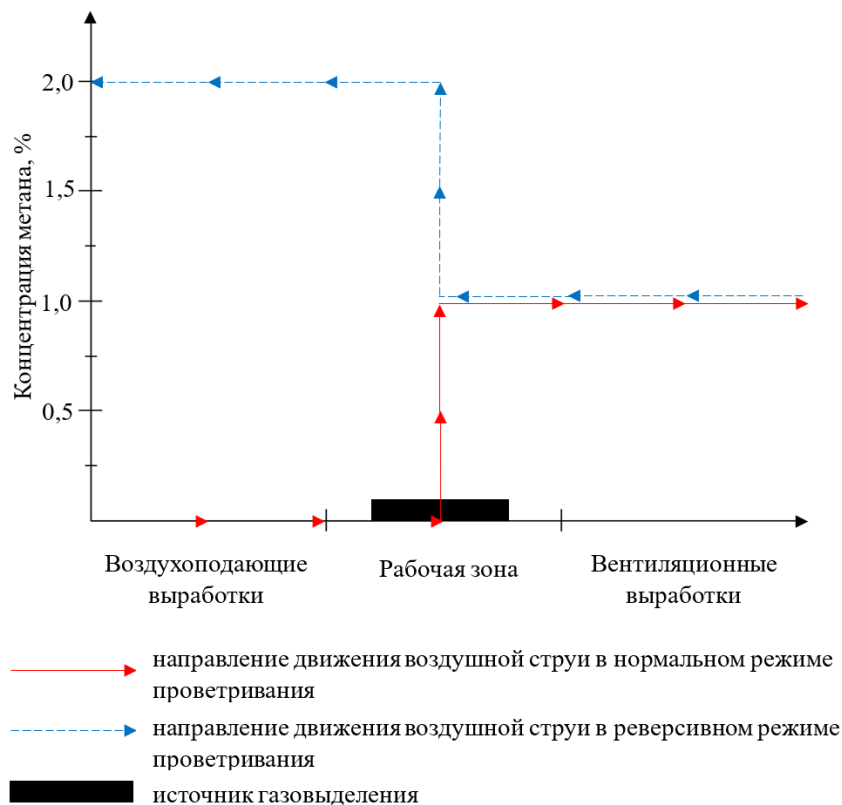


**Рис. 4.** График изменения концентрации газа в воздушной струе в условиях калийно-магнелиевых или полиметаллических рудников при  $c_0 = 0\%$ ,  $c_n = 0,5\%$

А для рудников с установленным «газовым режимом» ( $c_n = 1\%$ ), согласно формуле (5), количество воздуха, проходящего по главным выработкам в реверсивном режиме проветривания, должно равняться количеству воздуха, проходящему по этим выработкам в нормальном режиме, что на практике зачастую трудноосуществимо.

Перечисленные доводы указывают на то, что присутствующее в «Правилах безопасности...» [1] требование по обеспечению минимальным расходом воздуха в реверсивном режиме проветривания не в полной мере соответствует требованиям по обеспечению предельно-допустимых концентраций горючих газов в горных выработках. Кроме того, в настоящий момент не сформирован единый подход к обоснованию выбора того или иного коэффициента реверсирования воздушной струи на главных выработках полиметаллических и калийных рудников.

Производительность и депрессия ГВУ в реверсивном режиме проветривания могут существенно изменяться по сравнению с нормальным режимом по причинам, описанным в работе [11]. Изменение сопротивления подземной части рудника будет приводить к изменению расходов воздуха на концах главных направлений.



**Рис. 5.** График изменения концентрации газа в воздушной струе в условиях калийно-магниевого или полиметаллического рудника с установленным «газовым режимом» при  $c_0 = 0\%$ ,  $c_n = 1\%$

По мнению авторов настоящей работы, при выборе параметров главной вентиляционной установки для реверсивного режима проветривания не учитывается еще один значимый фактор – устойчивость движения воздушной струи, то есть свойство потока воздуха сохранять направление и скорость при движении по горным выработкам в условиях действия различных возмущающих факторов – переменных сопротивлений (в том числе местных) [8, 9] и переменных тепловых депрессий [10]. Однако, в условиях реального рудника спрогнозировать влияние непредвиденных аэродинамических факторов, связанных с такими событиями, как возникновение пожаров или самопроизвольное открытие вентиляционных перемычек, в масштабах вентиляционной сети в целом, трудновыполнимо. В работе [11] описывается методика, в которой определены факторы, влияющие на параметры работы ГВУ при переходе с нормального режима проветривания на реверсивный, а степень их влияния возможно определить, выполнив моделирование воздухораспределения в аналитическом комплексе «Аэросеть» [12].

В результате выполненного моделирования воздухораспределения в аналитическом комплексе «Аэросеть» при переходе с нормального режима проветривания на реверсивный для калийного и полиметаллического рудников было получено, что даже при обеспечении в главных выработках рудников в реверсивном режиме проветривания расходов воздуха не менее 60 % от соответствующих величин в нормальном режиме, непредвиденные аэротермодинамические факторы (пожары, открытие перемычек) могут привести к неустойчивому проветриванию выработок и, следовательно, к возможному их загазированию при возникновении аварийных ситуаций.

Таким образом, требование п. 176 «Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [1] по обеспечению минимальных расходов воздуха в

реверсивном режиме проветривания не в полной мере соответствует требованиям по обеспечению предельно-допустимых концентраций горючих газов в горных выработках. Кроме того, в настоящий момент не сформирован единый подход к обоснованию выбора того или иного процента реверсирования воздушной струи на главных выработках полиметаллических и калийных рудников.

Для исключения возможного загазирования выработок в случае возникновения непредвиденных аэротермодинамических факторов (пожары, открытие перемычек), а также для принятия эффективных технических решений при выборе рабочей точки главной вентиляционной установки (ГВУ) в реверсивном проветривания важным является учет устойчивости движения воздушной струи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номера НИОКТР: 124020500030-7, 122030100425-6).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утв. 08.12.2020, № 507. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140209> (Дата обращения 15.05.2024).
3. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил.
4. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция: [Учебник для горных вузов]. – М.; Л.: Углетехиздат, 1949. – С. 381-382.
5. РД 05-94-95. Правила безопасности в угольных шахтах: утв. Госгортехнадзор России, 30.12.1994 г., № 67. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029865>. (Дата обращения: 15.05.2024).
6. Pach G, Rózański Z, Wrona P, Niewiadomski A, Zapletal P, Zubíček V. Reversal Ventilation as a Method of Fire Hazard Mitigation in the Mines // *Energies*. – 2020. – V. 13, № 7. – 1755. – <https://doi.org/10.3390/en13071755>.
7. Duda, A. The Impact of Atmospheric Pressure Changes on Methane Emission from Goafs to Coal Mine Workings // *Energies*. – 2024. – V. 17, № 1. – P. 173. – <https://doi.org/10.3390/en17010173>.
8. Semin M.A., Levin L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – V. 124, Part B. – P. 167-171. – DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
9. Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2014. – № 9. – С. 200-205.
10. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 10. – С. 24-32. – DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.
11. Семин М.А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Семин Михаил Александрович. – Пермь, 2016. – 151 с.
12. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опублик. 20.02.2015. – 1 с.