

16. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., Suzuki J. Burning behaviour of sedan passenger cars // *Fire Safety Journal*. – 2009. – V. 44, №. 3. – P. 301-310.
17. Ingason H., Lönnemark A. Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels // *Fire Safety Journal*. – 2005. – V. 40, №. 7. – P. 646-668. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.06.002.
18. Василенко В.И. Принципы, критерии, алгоритмы управления проветриванием и устойчивость вентиляционных струй при авариях в шахте // *Изв. вузов. Горн. журн.* – 2010. – №. 8. – С. 42-46.
19. Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – №. 6. – С. 373-377.
20. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 249 с.
21. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания вентиляционных сетей // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН.* – Пермь, 2012. – С. 255-257.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.3.19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ РУДНИКОВ СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИИ

М.А. Семин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрена задача об определении мест размещения отрицательных регуляторов (автоматических вентиляционных дверей) при разворачивании систем автоматизированного управления проветриванием на примере медно-никелевого рудника. Предложена методика анализа взаимного влияния множества автоматических вентиляционных дверей на воздухораспределение в руднике, обеспеченность потребителей свежим воздухом в различные смены.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, динамическое управление проветриванием, автоматическая вентиляционная дверь, вентиляционная сеть, сложная топология.

Введение

Перспективным и популярным подходом к повышению энергоэффективности систем вентиляции подземных рудников в последние десятилетия является динамическое управление проветриванием [1]. За рубежом данный подход известен как вентиляция по требованию (Ventilation on demand) [2, 3]. Суть данного подхода заключается в том, чтобы подавать свежий воздух преимущественно в те рабочие зоны, в которых ведутся горные работы, при этом в оставшейся части рудника расходы воздуха должны быть минимизированы [4]. Экономический эффект от реализации такого подхода достигается за счет существенной разницы в требуемых расходах воздуха для проветривания рабочих зон рудник в различные смены. Вместо того, чтобы поддерживать на руднике стационарный режим проветривания из расчета на самую неблагоприятную смену, динамическое управление проветриванием позволяет снижать или увеличивать расход воздуха при переходе от одной смены к другой.

Вентиляция по требованию, получившая широкое распространение за рубежом, является аналогом систем автоматизированного управления проветриванием (САУП), теоретические основы которых были сформулированы в СССР еще в 70-е годы прошлого века [5]. В [4] указывается, что САУП является несколько более широким поня-

тием, чем вентиляция по требованию, а также включает в себя принципы динамического управления проветриванием. В настоящей статье речь будет идти больше о динамическом управлении проветриванием, присущем как САУП, так и вентиляции по требованию.

В [6] отмечается, что существующие реализации систем динамического управления проветриванием отличаются относительной компактностью рудников, обрабатывающих полиметаллические и железорудные месторождения – как в плане топологии вентиляционных сетей, так и в плане количества рабочих зон. При этом многие современные рудники на территории России и стран СНГ имеют очень протяженные шахтные поля (более 100 км²), большое количество рабочих зон, которые к тому же могут быть сильно удалены друг от друга. Это приводит к сложностям при попытке построить эффективную систему управления проветриванием на таких рудниках. Пример подобных сложностей описан в работе [7], где рассмотрено три возможных варианта систем управления на калийном руднике Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей по степени глубины управления. Показано, что экономически целесообразен только один вариант, соответствующий наиболее глубокому управлению, а экономия электроэнергии от внедрения данного варианта динамического управления проветриванием составляет около 15%.

Калийные рудники в России и Беларуси, как правило, имеют центральную схему проветривания, в рамках которой система вентиляционных выработок обычно образует понятную древовидную топологию, где можно легко выделить наиболее выгодные места для установки отрицательных регуляторов – автоматических вентиляционных дверей (АВД) [8]. Иная ситуация обстоит на некоторых полиметаллических рудниках на территории России, обладающих разветвленной системой горных выработок, плохо упорядоченным множеством подземных горизонтов и аэродинамических связей между ними. В данном случае выбор мест размещения отрицательных регуляторов не всегда очевиден. А их размещение только на вентиляционных выработках вблизи сопряжений с вентиляционными (воздуховыдающими) стволами может оказаться недостаточным для надлежащего перераспределения расходов воздуха между потребителями.

Дополнительной сложностью в регулировании проветриванием является наличие нескольких главных вентиляторных установок (ГВУ). В случае одной ГВУ управление АВД проще, так как в данном случае ГВУ решает только задачу обеспечения рудника суммарным количеством воздуха, а АВД перераспределяют его по вентиляционной сети. В случае множества ГВУ такое разделение функций между ГВУ и АВД размывается – в данном случае ГВУ не только обеспечивают суммарный расход в рудник, но и могут существенным образом перераспределить его, что неминуемо повлияет на алгоритмы работы АВД.

Вопрос эффективного выбора мест размещения отрицательных регуляторов при автоматизации проветривания на таких сложных объектах является на сегодня не решенным. В свою очередь, настоящее исследование направлено на разработку методики анализа и выбора наиболее благоприятных мест размещения отрицательных регуляторов на рудниках при внедрении систем автоматизированного управления проветриванием. В этой статье на примере медно-никелевого рудника, расположенного на севере Красноярского края, продемонстрирована разработанная авторами статьи методика анализа взаимного влияния множества АВД на воздухораспределение в руднике, обеспеченность потребителей свежим воздухом в различные смены.

Методика анализа вентиляционной сети

Методика описана на примере вентиляционной сети медно-никелевого рудника, представленной на рис. 1. Система разработки рудника – сплошная слоевая с закладкой

выработанного пространства и камерные системы разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Порядок выемки слоев – нисходящий, восходящий и комбинированный в зависимости от геологии рудного тела. Очистные и проходческие работы ведутся буровзрывным способом. Доставка руды и породы осуществляется самоходным дизельным оборудованием. Откатка руды и породы осуществляется электровозным транспортом. Очистные горные работы ведутся в пределах четырех подсечных горизонтов.

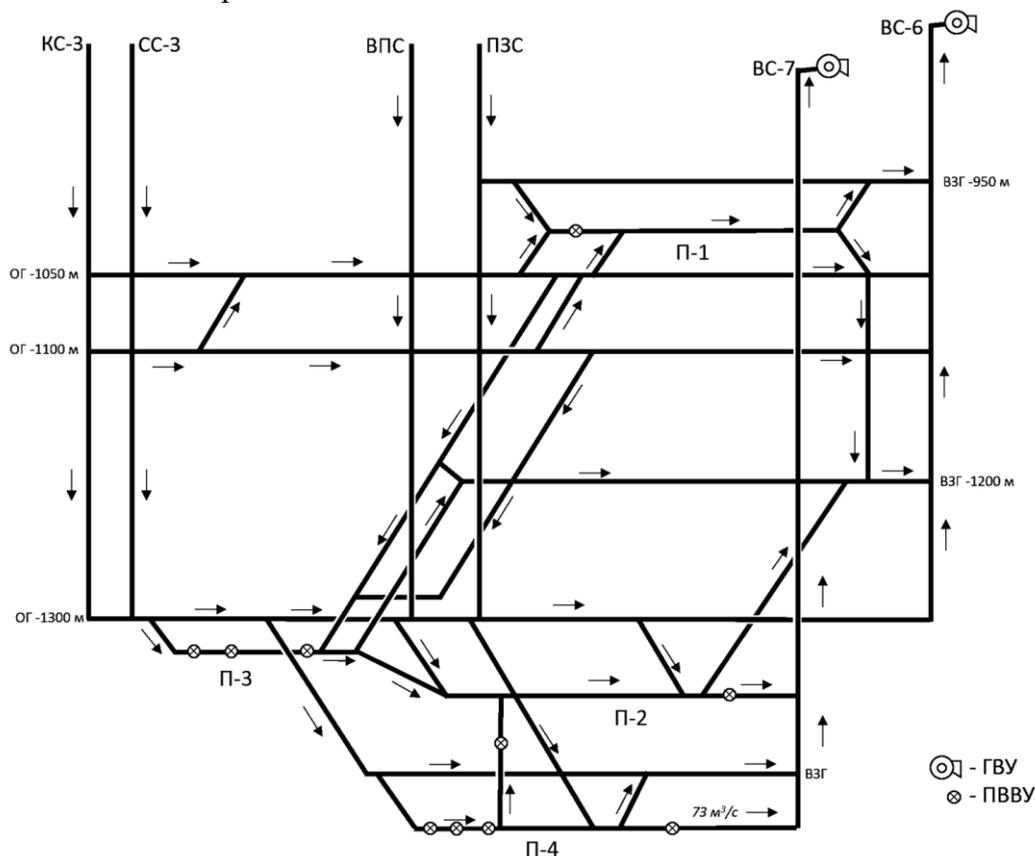


Рис. 1. Упрощенная схема вентиляционной сети рудника

Рудник проветривается всасывающим способом и имеет фланговую схему вентиляции. Подача воздуха в рудник осуществляется по четырем вертикальным стволам (они обозначены на рис. 1 как КС-3, СС-3, ПЗС и ВПС), а выдача в настоящий момент производится по двум вентиляционным стволам (ВС-6 и ВС-7), на каждом из которых установлена ГВУ. Помимо четырех подсечных горизонтов рудник имеет несколько вентиляционно-закладочных и откаточных горизонтов. Горизонты связаны с друг другом большим количеством аэродинамических связей (транспортные уклоны, рудоспуски, вентиляционные восстающие и пр.), которые не полностью отражены на схематичном рис. 1. Также на потребителях установлены передвижные вспомогательные вентиляторные установки (ПВВУ), оказывающие влияние на распределение воздуха.

Для повышения энергоэффективности системы вентиляции рудника предложено поэтапно внедрить систему автоматизированного управления проветриванием. На текущем этапе исследуется вопрос перераспределения воздуха только между четырьмя укрупненными потребителями. Они условно обозначены на рис. 1 как П-1, П-2, П-3 и П-4. Каждый из них, по сути, соответствует одному из горизонтов подсечки. Для организации динамического управления используется информация об основных сменах, для которых заданы различные требуемые количества воздуха (см. табл. 1).

Таблица 1

Рассчитанные количества воздуха,
требуемые для проветривания потребителей в различные смены

Потребитель	Требуемый расход воздуха		
	Рабочая смена, м ³ /с	Проведение взрывных работ, м ³ /с	Пересменка, м ³ /с
П-1	120,7	109,8	36,2
П-2	258,2	178,2	80,5
П-3	221,1	162,5	67,1
П-4	101,4	60,6	37,6

В качестве положительных регуляторов выступают две имеющиеся ГВУ, а в качестве отрицательных – некоторое множество АД, места расположения которых требуется подобрать. Основными критериями выбора мест размещения АД в данном случае являются:

- 1) техническая возможность установки АД (которая определяется, например, отсутствием постоянного движения транспорта);
- 2) техническая возможность регулирования расходами воздуха на потребителях в соответствии с требуемыми диапазонами расходов воздуха из табл. 1;
- 3) минимум суммарного количества АД.

Первый критерий позволяет минимизировать множество горных выработок, где возможна установка ГВУ. По сути, среди таких остаются только выработки вентиляционно-закладочных горизонтов, а также соединительные сбойки с вентиляционными стволами в пределах горизонтов подсеки. Установка АД на вентиляционных выработках откаточных горизонтов у сопряжения со стволами не рассматривается.

Второй критерий представляет предмет исследования, описываемый в настоящей статье. Следует отметить, что подобные вопросы ранее освещались в работах [9, 10]. В [9] использовались генетические алгоритмы, а в [10] – модель сотовой автоматизации. Как и в работе [9], для определения наилучших мест размещения АД с точки зрения возможности регулирования суммарных расходов воздуха на потребителях используется количественный показатель – матрица интенсивности (или корреляций). Если в [9] она представлена отношениями расходов воздуха в управляемой и управляющей выработках (ветвях вентиляционной сети) интенсивности, то в настоящей работе матрица аэродинамического влияния АД образована величинами [11]:

$$I_{ij} = \frac{\Delta Q_i}{\Delta R_j}, \quad (1)$$

где Q_i – суммарный расход воздуха на i -м потребителе, R_j – аэродинамическое сопротивление j -й АД.

Аналогичная матрица составляется для оценки влияния ГВУ, но здесь в знаменателе присутствует не приращение аэродинамического сопротивления, а приращение частоты оборотов j -й ГВУ.

$$I_{ij} = \frac{\Delta Q_i}{\Delta n_j}, \quad (2)$$

Предлагаемая в настоящей статье методика выбора наиболее благоприятных мест размещения отрицательных регуляторов на руднике с точки зрения возможности регулирования расходами воздуха на потребителей включает в себя следующие пункты.

1. Разработка модели воздухораспределения в вентиляционной сети рудника по фактическим данным о топологии вентиляционной сети, геометрии, расходах воздуха и депрессиях горных выработок, источниках тяги.
2. Анализ фактического воздухораспределения на модели вентиляционной сети рудника и определение основных вентиляционных трактов, по которым происходит отведение загрязненной воздушной струи с рассматриваемых потребителей.
3. Размещение начальной компоновки АД на всех основных воздушных трактах, по которым происходит отведение загрязненной воздушной струи с потребителей.
4. Анализ аэродинамического влияния АД и ГВУ на расходы воздуха на рассматриваемых потребителях, а также анализ взаимного влияния средств на самих себя.
5. В случае, если в рамках предложенной начальной компоновки АД остались потребители, в которых не могут быть обеспечены требуемые количества воздуха хотя бы в одну из смен, нужно разрабатывать дополнительные мероприятия (например, установку дополнительных перемычек, «отсекающих обходные пути» воздушной струи). В случае, если в рамках предложенной компоновки АД на всех потребителях воздух меняется достаточно сильно для того, чтобы обеспечить всех расходы воздуха из табл. 1, компоновка принимается.
6. В случае, если некоторые АД в предложенной компоновке оказывают слишком слабое влияние на расходы воздуха на всех потребителях, эти АД из предложенной компоновки исключаются. При этом делается проверка достижимости требуемых расходов воздуха на всех потребителях во все смены в рамках новой, усеченной компоновки АД.
7. Далее на модели вентиляционной сети рудника проводится имитационное моделирование работы алгоритма оптимального управления проветриванием, описанного в [4]. Такой алгоритм реализован, к примеру, в программе Аэросеть [12]. На данном этапе определяются наиболее трудно проветриваемые потребители в каждую из смен. В рамках итоговой компоновки АД проверяется достижимость оптимальных режимов проветривания за конечное время, меньшее длительности смен.
8. При необходимости проводится анализ эффективности работы регуляторов в аварийных режимах проветривания, связанных, к примеру, с появлением тепловых депрессий [13].

Анализ аэродинамического влияния регуляторов на проветривание потребителей

Пункт 4 данной методики требует дополнительных комментариев. Анализ аэродинамического влияния АД и ГВУ на расходы воздуха на рассматриваемых потребителях предлагается проводить помощью матричных графиков. На рис. 2 графически изображена матрица аэродинамического влияния (2) параметров работы ГВУ на суммарные расходы воздуха на потребителях. Абсолютные величины коэффициентов матрицы влияния характеризует силу воздействия элементов управления (в данном случае ГВУ) на объекты управления (расходы воздуха на потребителях). Знак указывает на направленность воздействия – увеличению расхода воздуха соответствует знак «+», а его уменьшению – знак «-». Получено, что на потребитель П-1 доминирующее влияние оказывает ГВУ на стволе ВС-6, в то время как режим работы ГВУ ствола ВС-7 практически не сказывается на этом потребителе. П-2, а также П-4 в наибольшей степени подвержены воздействию ГВУ на стволе ВС-7. П-3 является наиболее сложным объектом регулирования, так как он примерно в равной мере подвержен влиянию обеих ГВУ.

	П-1	П-2	П-3	П-4
ГВУ ВС-6	0,302	-0,024	0,060	-0,018
ГВУ ВС-7	0,003	0,177	0,053	0,084

Рис. 2. Матрица влияния частот оборотов ГВУ на суммарные расходы воздуха на потребителях

Аналогичная матрица аэродинамического влияния строилась для АВД. В начальную компоновку было отнесено 13 АВД. В силу схематичности рис. 1, графическое изображение АВД на этом рисунке крайне затруднительно и потому не представлено. На рис. 3 изображена матрица аэродинамического влияния (1) сопротивлений АВД на суммарные расходы воздуха на потребителях.

		АВД												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
П-1	-104	-385	13	2	-6	-2	1	1	1	2	0	1	2	
П-2	13	53	-4	0	69	31	-69	-45	-1	9	-1	1	1	
П-3	19	46	-6	-1	-2	-1	-1	-1	0	0	-15	-23	6	
П-4	5	13	-1	0	28	12	19	12	-9	-32	6	4	10	

Рис. 3. Матрица влияния сопротивлений АВД на суммарные расходы воздуха на потребителях

Из рис. 3 видно, что АВД № 1 и 2, расположенные на вентиляционно-закладочном горизонте ВЗГ -950 м, оказывают наибольшее влияние на потребитель П-1. Увеличение аэродинамического сопротивления этих АВД приводит к существенному уменьшению расходов воздуха на П-1, что следует из абсолютных значений величин и знаков «←» в соответствующих ячейках на рис. 3. На П-2 наибольшее влияние оказывают АВД 5-8. При этом если закрытие АВД 7-8 приводит к уменьшению расхода на П-2, то закрытие АВД 5-6 приводит к увеличению расхода на нем. По-видимому, это связано с тем, что при закрытии АВД 5-6 меньше воздуха идет на вентиляционно-закладочный горизонт ВЗГ -1200 м, при этом излишек воздуха устремляется по П-2 на ствол ВС-7. Потребитель П-3 подвержен влиянию АВД 1-2 и 11-12. При этом основные для П-3 АВД 11-12 (а также 13) оказывают гораздо более слабое воздействие, чем АВД 1-2, направленные на решение совсем другой задачи – регулировать расход воздуха на П-1. Аналогичная ситуация имеет место для П-4. Основные АВД 9 и 10 имеют сопоставимое и иногда более слабое влияние на расход воздуха на этом потребителе, чем АВД 5-8, регулирующие расход на П-2.

Примечательно, что четыре АВД (3, 4, 9, 13) имеют очень низкие коэффициенты влияния на все 4 потребителя. Это указывает на то, что они не сумеют существенным образом повлиять на расходы воздуха на них даже при полном перекрытии. Мы смоделировали ситуацию полного перекрытия этих АВД (аэродинамическое сопротивление $30 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$). Получено, что АВД 3, 4, 9 и 13 при полном закрытии не способны изменить расход на потребителях даже на 4%. Одновременное закрытие АВД 3-4 также не решает проблему (расход изменяется только на 10%). Одновременное закрытие АВД 11 и 12 также оказывает очень слабое влияние на расходы на потребителях, что сопряжено с тем, что в такой сложной системе выработок воздух находит «обходной путь» (начинает идти по ВЗГ -1200 м в большей степени на ВС-7, а не на ВС-6) и продолжает идти в тех же количествах на основные потребители. Это указывает на необходимость разработки дополнительных мероприятий по установке перемычек воздуха на «обходных путях» движения воздуха.

Проведенный анализ аэродинамической чувствительности позволяет из общей компоновки АВД выделить несколько групп (или кластеров АВД) исходя из характера их влияния на потребители. Такой кластерный анализ может быть проведен как на рис. 3, так и в фазовом пространстве относительных изменений расхода воздуха на потребителях. Пример такого фазового пространства для трех потребителей (П2, П3 и П-4) приведен на рис. 4.

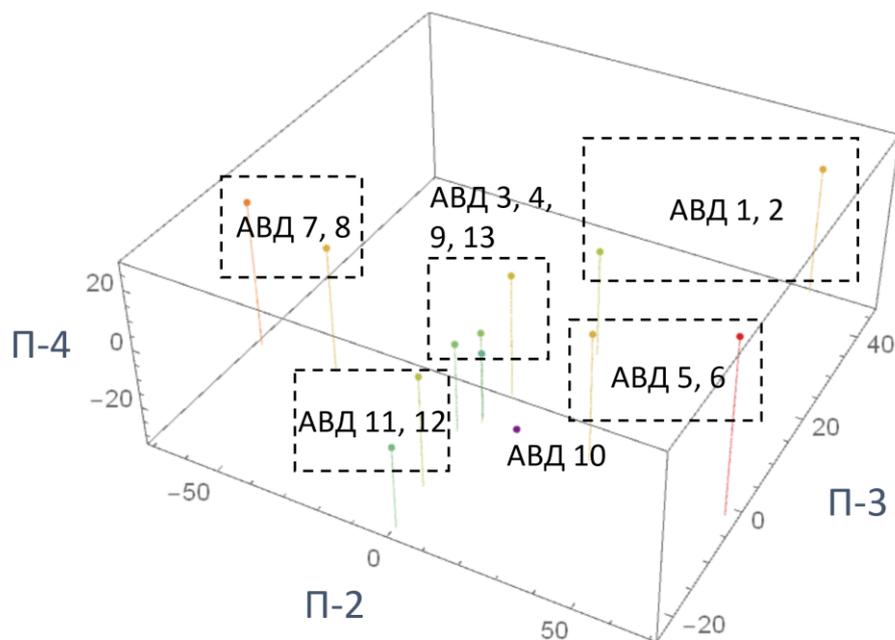


Рис. 4. Фазовое пространство относительных изменений расхода воздуха на потребителях, по осям отмечены относительные изменения расходов воздуха на потребителях (%) при полном перекрытии АВД

Анализ П-1 не представлен на рис. 4 по той причине, что он оказывается наименее интересным – согласно рис. 3, расход воздуха на этом потребителе подвержен изменению преимущественно при вариации сопротивлений АВД 1 и 2.

Сформированные группы АВД по принципу схожести аэродинамического влияния на потребителей в дальнейшем предлагается регулировать синхронно, что существенно повысит устойчивость алгоритма управления проветриванием. Исключением является группа АВД 3, 4, 9, 13, для которых влияние на всех потребителей является одинаково слабым.

Еще одним важным этапом является анализ взаимного влияния АД и ГВУ друг на друга, что можно осуществить по тому же методу – составляя матрицы влияния типа (1) и (2). Из этого анализа также возможно выделить группы АД, оказывающих наиболее сильное влияния друг на друга. Такие группы АД могут частично или полностью совпасть с группами, выделенными на рис. 4. В случае сильного влияния АД друг на друга следует учитывать их взаимосвязь в управляющих уравнениях для угла поворота жалюзийных створок АД. В простейшем случае это реализуется путем задания синхронного регулирования. Более сложный вариант (например, АД-связки, предложенные в работе [14]) следует применять в том случае, если варианты полностью независимого и синхронного регулирования АД оказываются не эффективны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках государственного задания (проект № 122030100425-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гришин Е.Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Санникович А.Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 103-108. – DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15.
2. Wallace K., Prosser B., Stinnette J.D. The practice of mine ventilation engineering. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – V. 25, № 2. – P. 165-169. – DOI:10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
3. Стадник Д.А., Стадник Н.М., Лопушняк Е.В., Кумсиев Г.А. Методические принципы оптимального управления воздухораспределением подземного рудника в системах «Вентиляция по требованию» // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2022. – № 1. – С. 457-466. – DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-457-466.
4. Семин М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 623-632. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
5. Местер И.И., Засухин И.Н. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания. – М.: Недра, 1974. – 239 с.: ил.
6. Кашников А.В., Круглов Ю. В. Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 594-605. – DOI: 10.31897/PMI.2022.75.
7. Бублик С.А., Зайцев А.В., Мальцев С.В., Семин М.А. Анализ эффективности систем динамического управления проветриванием на калийных рудниках // Горное эхо. – 2021. – № 3 (84). – С. 81-89. – DOI: 10.7242/echo.2021.3.15.
8. Поспелов Д.А., Зайцев А.В., Семин М.А. Совершенствование алгоритма автоматизированного управления проветриванием калийных рудников // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 133-138. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.24.
9. Козырев С.А., Осинцева А.В. Оптимизация размещения регуляторов распределения воздуха в вентиляционной системе рудника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 5. – С. 135-143.
10. Wang K., Jiang S., Wu Z., Shao H., Zhang W., Pei X., Cui C. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines // Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – V. 111. – P. 491-506.
11. 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.
12. Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – № 9. – С. 200-205.
13. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горн. журн. – 2014. – №12. – С. 105-109.
14. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д.т.н.: 25.00.20 / Круглов Юрий Владиславович. – Пермь, 2012. – 340 с.