

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д.т.н.; 25.00.20: защищена 23.05.19 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2019. – 247 с.
2. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.: ил.
3. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах: – М.: Госгортехиздат, 1961. – 247 с.
4. 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).
5. Pokhrel S., Kuyuk A.F., Kalantari H., Choreishi-Madiseh S.A. Techno-economic trade-off between battery storage and ice thermal energy storage for application in renewable mine cooling system // Applied Sciences. – 2020. – V. 10, №. 17. – номер статьи 6022.
6. Шувалов Ю.В., Бобровников В.Н., Согрин Б.А., Ганшевский С.П. Тепло-хладоснабжение шахт и рудников с использованием низкопотенциальных источников тепла (холода) и фазовых переходов воды // Горн. информ.-аналит. бюл. – 1999. – № 4. – С. 224-225.
7. Лискова М.Ю., Воронкова Ю.А., Голик В.И. Основные способы нормализации теплового режима рудника // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2018. – №. 4. – С. 85-94.
8. Trapani K., Chen Z. Computational fluid dynamic modelling of the Frood-Stobie ice stope thermal storage for mine ventilation heating // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – С. 289-298.
9. Kamyar A., Aminossadati, Leonardi C., Sasmito A. Current developments and challenges of underground mine ventilation and cooling methods // Coal Operators' Conference. –Wollongon. – 2016. – С. 277-287.
10. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust», The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. – P. 285-292.
11. De Wet J., Mackay L., Bluhm S., Walter K. Refrigeration and ventilation systems for ultra-deep platinum mining in the bushveld igneous complex // Proceedings of the 10th international mine ventilation congress. – Sun City, South Africa. – 2014. – С. 2-8.
12. Belle B., Biffi M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – V. 28, №. 6. – С. 865-875.
13. Srivatsan J.S., Pandey A., Current developments in mine air cooling systems: case study of an Indian coal mine using different cooling strategies // Recent advances in mining technology (RAMT). – 2019. – С. 23-24.
14. Wang M., Liu L., Chen L., Zhang X., Zhang B., Ji C. Cold load and storage functional backfill for cooling deep mine // Advances in Civil Engineering. – 2018. – V. 2018. – Номер статьи 5435214.
15. Тарасова Е.В. Системы кондиционирования воздуха с сезонными аккумуляторами естественного холода: дис. ... к.т.н.: 05.23.03: / Тарасова Елена Владимировна. – Владивосток, 2013. – 151 с.: ил.
16. Тарасова Е.В., Штым А.С. Изменение термодинамических параметров охлажденного воздуха при прямом контакте с естественным источником холода // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 107-112.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2023.1.21

**ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО РУДНИКА**

А.В. Пугин, А.В. Богомягков, А.А. Оглоблина, К.М. Агеева
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В условиях действующего рудника поддержание ледопородного ограждения (ЛПО) представляет собой нетривиальную задачу, в корне отличающуюся от аналогичной при проходке шахтного ствола. Изменяются факторы, оказывающие ключевое воздействие на характер теплопритоков в замороженный массив, особенно со стороны ствола. В статье источники

(процессы) тепловыделений ранжируются по степени их теплового воздействия и показано, что основным фактором, определяющим режим работы замораживающего комплекса в условиях действующего рудника является проветривание. Существенное влияние на состояние ЛПО и, соответственно, режим работы замораживающей станции воздухоподающего ствола оказывают сезонные климатические изменения температуры внешней среды, а выдающего – глубина ведения горных работ. Показано, что в воздухоподающем стволе процессы теплообмена воздуха с охлажденной крепью и гидростатического сжатия являются компенсирующими по отношению друг к другу, тогда как в выдающем – имеют сонаправленное действие.

Ключевые слова: ледопородное ограждение, термометрический контроль, теплофизическое моделирование, распределение температур.

Ледопородное ограждение, возводимое в интервале неустойчивых водонасыщенных пород перед и поддерживаемое в период проходки шахтного ствола обычно не представляет интереса для наблюдений после завершения работ при условии успешной гидроизоляции горной выработки.

В редких случаях нормальная последовательность ведения горных работ по какой-либо причине нарушается и потребность в поддержании рабочих характеристик ЛПО сохраняется даже на этапе функционирования рудника.

В этом случае поддержание ЛПО шахтного ствола в большей степени ассоциировано с процессами горного производства нежели в период проходки. Влияние естественных и техногенных источников теплоты значительно возрастает, интенсифицируются процессы теплообмена в системе «ствол-массив», становятся более динамичными и требуют повышенного внимания к управлению состоянием ледопородного ограждения.

Предположим, что каждый источник за малую единицу времени dt выделяет количество теплоты $W = W(t)$ (назовем это мгновенной интенсивностью источника). Тогда полная тепловая мощность источника в течение времени его действия τ будет выражаться интегралом $W_{\Sigma} = \int_{\tau} W dt$ и характеризовать степень его теплового влияния на окружающую среду.

Следовательно, основные факторы (процессы), воздействующие на термодинамическое состояние массива помимо замораживающих колонок, по тепловому влиянию W_{Σ} можно ранжировать в виде матрицы альтернатив «интенсивность (W) – длительность (τ)». Данная классификация условна и не подразумевает численных критериев перехода из одного класса в другой. Например, интенсивным можно считать воздействие, обеспечивающее тепловое возмущение в среде, которое удовлетворяет одновременно трем качественным критериям: (а) по интенсивности выше предела чувствительности измерительных средств, применяемых для его фиксации, (б) способно в короткое время существенно изменить тепловое состояние массива в некоторой области (область воздействия) и (в) требует компенсационного изменения режима работы замораживающей станции.

При проходке ствола матричное ранжирование будет выглядеть соответственно таблице 1, и если интенсивность теплового воздействия буровзрывных (БВР) работ невелика (процесс взрыва является квазиadiaбатическим), то при использовании стволопроходческого комбайнового комплекса типа SBR тепловыделения составляют в среднем 600-1000 кВт и длятся большую часть суток. В обоих случаях тепловыделения передаются в атмосферу выработки и отводятся из нее путем проветривания.

Величина земных теплопритоков к внешней границе ЛПО выходит на стационарное значение спустя несколько месяцев активного замораживания и впоследствии существенно не меняется, а значит, оказывает влияние на режим работы замораживающей станции только в период активного формирования ЛПО [1].

Остальные технологические процессы не оказывают существенного теплового воздействия на массив. Так, в работе [2] показано, что тепловыделения твердеющего бетона при креплении стенок выработки способны повысить температуры внутренней, приконтурной части ЛПО на несколько градусов, но недостаточны для оттаивания породы. Тепловое влияние этого фактора полностью компенсируется замораживающей станцией без изменения режима ее работы.

Таблица 1

Ранжирование тепловых факторов при строительстве ствола

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ	Длительное	Кратковременное
Интенсивное	¹ проходка (комбайн)	крепление стенок бетоном тампонажные работы
Слабое	проветривание	² проходка (БВР) перемещение сосудов и материалов

^{1/2} — способ проходки «или/или»

Натурными измерениями не зафиксировано сколько-нибудь значимое тепловое влияние перемещаемых по стволу сосудов (бадей) и материалов, например, спускаемых чугунных тубингов или бадьи с бетонным раствором, имеющими положительную температуру.

На этапе проходки ствола ЛПО помогает решить равно две задачи: 1) геомеханическую – придание устойчивости стенкам выработки до момента полноценного крепления, и 2) фильтрационную – предотвращение просачивания подземных вод в строящуюся выработку.

Тампонаж закрепного пространства, выполняемый с целью гидроизоляции ствола и консолидации массива вблизи границы «бетон-порода», требует от ЛПО лишь решения фильтрационной задачи, поскольку механическую защиту обеспечивает установленная постоянная крепь. С одной стороны, необходимо наличие оттаявшей породы за крепью, способной принять инъекцию тампонажного раствора взамен вытесненной воды. С другой – сохранение целостного ЛПО, окружающего ствол, крайне желательно, поскольку оно играет роль барьера, препятствующего утечке значительных объемов тампонажного раствора в массив, вызывая тем самым перерасход материала.

Тепловыделения от твердеющего тампонажного раствора интенсифицируют размораживание массива, однако ЛПО уже не требуется, поскольку финальная стадия гидроизоляции ствола завершена. Разумеется, за исключением контрольного тампонажа отдельных участков по необходимости.

Таким образом, при проходке ствола отсутствуют интенсивные тепловые факторы, способные оказать существенное воздействие на некоторую область ЛПО. Исключение составляет применение стволопроходческих комбайновых комплексов, однако их тепловыделения должны быть учтены в проекте на замораживание горных пород и скомпенсированы корректным выбором режима работы замораживающего комплекса.

В условиях эксплуатации рудника матрица ранжирования тепловых факторов меняется к виду, представленному в таблице 2. Основным фактором тепловыделений становится проветривание.

В процессе строительства ствол проветривается как тупиковая выработка с малым расходом воздуха и его естественной температурой (внешней атмосферы), либо с минимальным подогревом в холодное время года. Скорость воздуха, поднимающегося от забоя к устью ствола, составляет десятые или даже сотые доли метра в секунду, что обеспечивает незначительный теплообмен с крепью.

Таблица 2

Ранжирование тепловых факторов в условиях действующего рудника

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ	Длительное	Кратковременное
Интенсивное	проветривание	тампонаж
Слабое	перемещение сосудов	—

Из опыта авторов статьи, в стволах с небольшой глубиной замораживания (300-400 м) разница максимальной и минимальной температур воздуха в стволе составляет не более 5°C, что при расходе 10 м³/с дает суммарно порядка 60 кВт тепловыделений в массив. В стволах с большой глубиной замораживания эта разница может достигать 15°C и более, что при аналогичном расходе воздуха дает около 200 кВт тепловой мощности.

В условиях действующего рудника подача воздуха в ствол осуществляется в объемах, необходимых для проветривания всего шахтного поля. Скорость воздуха в стволе возрастает до нескольких метров в секунду (до 15 м/с в стволах, по которым производятся спуск и подъем людей и грузов, согласно п. 152 ФНИП [3]), а его температура – до +20°C и более, что создает условия для интенсивного теплообмена с крепью и далее – с примыкающим к ней замороженным массивом.

Исследуем два возможных варианта развития ситуации:

– ствол является воздухоподающим, т. е. воздух поступает с поверхности с температурой окружающей среды в теплый период либо нагретый до +2°C в холодное время года (минимальная температура согласно п. 151 Федеральных норм и правил (ФНИП) [3]), за исключением шахт, обрабатывающих месторождения полезных ископаемых (МПИ) в зоне многолетней мерзлоты;

– ствол является выдающим, т. е. воздух в него поступает из рудника и имеет квазипостоянную температуру, величина которой, в отсутствие интенсивных источников тепловыделений в околоствольном дворе, определяется температурой окружающего массива.

Рассмотрим первый вариант в ситуации, близкой к реальности. Пусть воздух нагнетается в ствол, его температура на устье составляет +26°C в летний период, а вблизи дна ЛПО на глубине 850 м – +31°C, и распределение температуры по стволу линейно. Тогда разница температур составит +5°C, при оценке разогрева воздуха за счет гидростатического сжатия на +6,5°C [4]. Недостающие 6,5 – 5 = 1,5°C возникают за счет теплообмена воздуха с ЛПО через крепь. В таком случае при расходе воздуха 500 м³/с интегральная мощность тепловыделений составит уже порядка 1000 кВт.

В зимний период перепад температур воздуха на устье и вблизи дна ЛПО не так значителен и составляет около 6,0°C, что при той же величине нагрева за счет гидростатического сжатия дает недостающие 6,5 – 6,0 = 0,5°C и около 300 кВт тепловыделений в массив. Заметим, что ситуация идеализирована, т.к. учитываются только процессы теплообмена, а изменение температуры за счет массообмена (например, конденсации влаги) исключается из рассмотрения.

В условиях значительных расходов воздуха на контакте ЛПО с передовым бетоном может образовываться зона талой породы. Сезонные изменения температуры поступающего в ствол воздуха определяют динамику увеличения или уменьшения размеров этой зоны. При постоянном режиме работы замораживающей станции столь существенные колебания теплопритоков к замороженному массиву со стороны ствола могут вызвать значительные перемещения внутренней границы мерзлой породы: от полного промерзания крепи до отхода от нее на несколько метров, как показано на рисунке 1 (результаты теплофизического моделирования в программном обеспечении (ПО) «FrozenWall»[5, 6]).

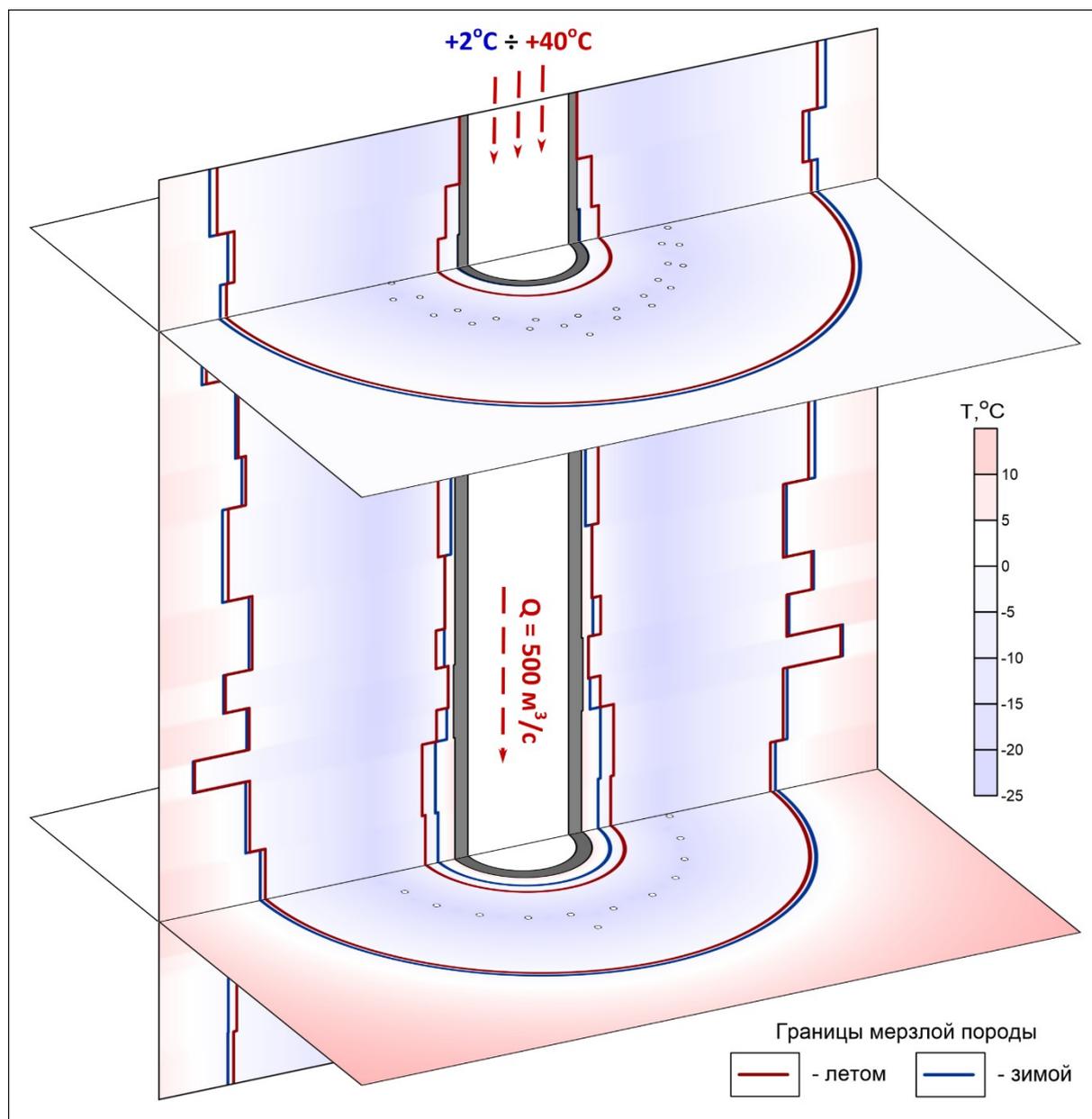


Рис. 1. Положение границ ЛПО на псевдоразрезе и в горизонтальных сечениях в наиболее теплое и холодное время года

Циклические температурные изменения и фазовые переходы (замерзания воды/плавление льда) меняют напряженно-деформированное состояние (НДС) массива и оказывают неблагоприятное влияние на крепь ствола. Поэтому рекомендуется коррек-

тировать режим работы замораживающего комплекса таким образом, чтобы перемещения внутренней границы ЛПО в течение года были минимальными (в допустимых пределах), например, как показано на рисунке 2.

В случае выдающего ствола температура поступающего в него воздуха является квазипостоянной в течение года и определяется температурой массива на сопряжении с горными выработками. В условиях глубоких рудников ее значение может достигать, $+30^{\circ}\text{C}$ и более. При тех же геометрических параметрах обратное гидростатическое расширение охладит воздух на $6,5^{\circ}\text{C}$, что снизит суммарное тепловыделение в массив и, соответственно, нагрузку на замораживающую станцию. Поскольку температуры в стволе не подвержены климатическим изменениям, режим работы замораживающего комплекса также является квазипостоянным и может быть определен из условия малого перемещения внутренней границы ЛПО.



Рис. 2. Относительное изменение температуры хладоносителя в рассольной сети для компенсации влияния климатического фактора в теплое и холодное время года

Предположим, что режим проветривания рудника в процессе эксплуатации меняется, воздухоподающий ствол становится выдающим и наоборот. В этом случае меняется характер теплопритоков к ЛПО со стороны крепи и требуется корректировка режима замораживания на основе математического моделирования.

В воздухоподающем стволе процессы теплообмена воздуха с крепью и гидростатического сжатия являются компенсирующими по отношению друг к другу, тогда как в выдающем – имеют сонаправленное действие. Следует отметить, что при сопряженном теплообмене в системе «воздух-крепь-массив» интенсивность процессов нелинейно меняется с глубиной [7, 8]. Данный вопрос требует отдельного изучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Пугин А.В. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №1. – С. 162-171. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200118.
2. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – V. 107. – № статьи 103685. – DOI 10.1016/j.tust.2020.103685.

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, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
4. Зайцев А.В., Семин М.А., Паршаков О.С. Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250, № 4. – С. 562-568. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.
5. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомягков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опубл. 17.12.2018. – 1 с.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237, № 3. – С. 268-274. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.268.
7. Семин М.А., Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 112-123. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.
8. Olkhovskiy D.V., Kuzminykh E.G., Zaitsev A.V., Semin M.A. Study of Heat and Mass Transfer in Ventilation Shafts of Deep Mines in the Case of Airflow Reverse // Journal of physics: Conference Series. – 2021. – V. 1945, № 1 – № статьи 012044. – DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012044.

УДК: 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.1.22

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗООБИЛЬНОСТИ РАБОЧИХ ЗОН НА РУДНИКАХ ВМКМС

А.Н. Стариков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Работа посвящена оценке влияния фактора неравномерности газовыделения из призабойного пространства тупиковых выработок рудников ВМКМС при работе добычного оборудования на расчет относительной газообильности рабочих зон. Рассмотрено несколько способов определения коэффициента неравномерности газовыделения. Выполнены замеры концентрации горючих и токсичных газов для определения неравномерности газовыделения. Основной идеей разработки коэффициента является повышение точности показаний при определении относительной газообильности в условиях цикличности работы добычного оборудования. Применение коэффициента неравномерности в формуле по определению относительной газообильности приведет к повышению точности при определении необходимого количества воздуха для проветривания рабочих зон комбайновых комплексов.

Ключевые слова: рудничный воздух, рудничная вентиляция, относительная газообильность, газовая съемка, рабочая зона, коэффициент неравномерности, мокрый способ.

Очистные работы на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей (ВМКМС) ведутся при помощи коротких очистных забоев комбайновым способом. Известно, что разработка промышленных пластов на данном месторождении почти всегда сопровождается процессом выделения газов из массива. Такие условия, в соответствии с п. 164 действующих правил безопасности [1], требуют разработки специальных мероприятий [2] по безопасному ведению горных работ на месторождении. К наиболее важным мероприятиям для сохранения безопасных усло-