

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Специальные мероприятия по безопасному ведению горных работ на Усть-Яйвинском руднике БКПРУ-3 ПАО «Уралкалий» в условиях «газового режима». – Пермь; Соликамск. – 2021. – 97 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
3. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление / под. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Выш. шк., 2000. – 335 с.: ил.
4. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. – Пермь: Тип. Купца Тарасова, 2008. – 412 с.: ил., табл.
5. Иванов О.В. Научно-учебный измерительный комплекс для изучения газоносности горных пород по связанным газам // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 223-225.
6. Инструкция по эксплуатации планетарных шаровых мельниц тип РМ100/РМ200. Retsch GmbH & Co. KG, Naan, Germany, Doc.Nr. D 98.540/640.9999. – 2004. – 32 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2025.4.10

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РУДНИЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Е.В. Накаряков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Объектом исследования является паспортная характеристика газовой промышленности взрывчатых веществ, применяемых при ведении буровзрывных работ в подземных условиях. Проведенный анализ различных источников литературы показывает расхождение паспортных и фактических показателей газовой взрывчатых веществ. Проведенные натурные эксперименты в условиях тупиковых очистительных камер демонстрируют, что объем выделившегося за время проветривания оксида углерода составляет менее 30% от расчетных значений для конкретных проведенных условий. Для оценки величины указанного соотношения необходимо проведение подобных экспериментов для различных горно-геологических и горнотехнических условий.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, рудничная вентиляция, газовость, ядовитые газы, зона отброса газов.

При проектировании системы вентиляции подземных рудников, ведущих отработку запасов буровзрывным способом, одним из основополагающих факторов при расчете потребного количества воздуха является вынос вредных газов от производства взрывных работ. Расчет по этому фактору опирается на количество взрывчатого вещества и его газовость по вредным компонентам.

С научной точки зрения при изучении процесса выноса газов от взрывных работ зачастую применяются приемы численного моделирования. Важнейшей задачей при численном моделировании процесса проветривания является задание начальных и граничных условий по концентрациям газов в пространстве изучаемой горной выработки. Начальное газораспределение задается исходя из соотношения объема выделившегося газа (рассчитываемого из количества взрывчатого вещества и его газовой способности по вредным компонентам) и объема выработки.

Таким образом, для решения научно-практических задач, связанных с выносом газов от взрывных работ, газовость применяемого взрывчатого вещества является одним из важных параметров, который необходимо заранее знать. Исследованию именно этого параметра посвящена настоящая работа.

В работе [1] на основании численного моделирования установлено, что на эффективность удаления газов после ведения взрывных работ в тоннеле влияют: скорость

воздуха, выходящего из трубопровода; отставание трубопровода до забоя; параметры размещения трубопровода в выработке. В работе [2] изучаются закономерности распространения угарного газа (СО) после производства взрывных работ в условиях высокогорных тоннелей с использованием нагнетательного способа проветривания. Основное внимание уделяется пространственно-временной модели распространения концентрации газа. Предложена математическая модель, описывающая распределение концентрации СО в зависимости от времени, расстояния от забоя, высотной отметки горной выработки, количества воздуха и других параметров. Модель подтверждена натурными измерениями. В статье [3] подробно исследуется проблема выноса газов после взрывных работ в спиральном тоннеле. Методами численного моделирования и статистического анализа определены ключевые факторы, влияющие на этот процесс, их значимость, и предложена оптимальная конфигурация вентиляционной системы для его эффективного решения. В работах [1, 2, 3] в качестве граничного условия начального газораспределения при моделировании использована начальная концентрация газа, рассчитанная с учетом паспортных значений газовости взрывчатки (40 л/кг).

В работе [4] изучаются закономерности распространения угарного газа после взрывных работ в условиях высокогорья (низкое давление, низкое содержание кислорода), где неполное сгорание взрывчатки приводит к повышенному выделению СО. Изучение производится с использованием численного моделирования. Результаты моделирования подтверждаются натурными экспериментами. Исследование [5] посвящено оптимизации проветривания при проведении буровзрывных работ в процессе строительства железнодорожного тоннеля. С помощью численного моделирования изучается, как воздушный поток переносит и удаляет вредные газы (в основном СО). При расчете начальной концентрации величина газовости взрывчатого вещества в работах [4, 5] в явном виде не указана. Однако косвенно по формулам можно судить, что начальная концентрация рассчитывается с учетом паспортных значений (в формулах отсутствуют какие-либо эмпирические коэффициенты).

Статья [6] посвящена оптимизации проветривания после проведения взрывных работ в тоннеле с точки зрения обеспечения безопасности рабочих и снижения энергозатрат. С помощью численного моделирования, параметризованного на основе натуральных измерений, авторы подбирают оптимальные параметры проветривания. При моделировании начальное газораспределение задается с учетом начальной концентрации газа, рассчитанной по газовости эмульсионной взрывчатки. Величина газовости по оксиду углерода принята 14 л/кг.

В работе [7] коллектив авторов производил оценку паспортной и фактической газовости промышленных взрывчатых веществ. По результатам проведенного анализа применяемых методов измерения концентрации ядовитых газов и полигонных испытаний отмечено несоответствие паспортных характеристик (газовости) промышленных взрывчатых веществ, применяемых на горнодобывающих предприятиях Российской Федерации. Так, экспериментально доказано, что в полигонных условиях для алюмо- и тротилсодержащих взрывчатых веществ наблюдается увеличенное содержание ядовитых газов. Например, фактическая газовость гранулита АС-8 выше паспортной более чем в 2 раза. В работе [8] не проводится прямого сравнения паспортной и фактической газовости применяемых взрывчатых веществ, однако фиксируется длительное присутствие высоких концентраций токсичных газов (СО и NO<sub>x</sub>), что может указывать на недостаточность учета реального объема газовыделения при проектировании вентиляции. В работе [9] проведен сравнительный анализ объема выделившихся оксидов углерода (СО, СО<sub>2</sub>), определенных по замеренным концентрациям в выработке и рассчитанных по химическим формулам разложения взрывчатых веществ в зависимости от их типа и массы. Результаты показали схожие значения, что говорит о возможности использования паспортных данных для ориентировочной оценки. Однако фактическое время проветривания выработок после взрыва

существенно превышало нормативные значения. Это косвенно может указывать на то, что, во-первых, выработки имеют большую длину, во-вторых, реальное газовыделение может быть выше расчетного. В работе [10] при валидации математической модели авторы столкнулись с необходимостью подбора эффективного показателя газовойности применяемого взрывчатого вещества. Указанное в паспорте значение газовойности на два порядка выше значения, которое позволяет достичь соответствия модели экспериментальным данным. Это прямо указывает на существенное расхождение между паспортной и реальной газовойностью при конкретных условиях взрыва. Авторы также отмечают, что газовость может варьироваться в зависимости от минералогического состава пород и условий взрыва.

В большинстве представленных исследований [1-6] при численном моделировании процессов проветривания используется паспортное значение газовойности взрывчатых веществ. Это значение (например, 40 л/кг или 14 л/кг) является теоретическим и рассчитывается по химическим формулам идеального разложения взрывчатых веществ в лабораторных условиях. Однако исследования [7-10] прямо или косвенно указывают, что этот подход не отражает реальной ситуации.

Таким образом, ключевым фактором, влияющим на корректность предварительной оценки и принятых на основании расчетов параметров проветривания после ведения взрывных работ, является точность исходных данных о реальном объеме газовыделения. Дальнейшие исследования должны в обязательном порядке учитывать поправочные коэффициенты, позволяющие определять фактическую газовость применяемых взрывчатых веществ в конкретных условиях.

В качестве исходных данных для изучения фактической газовойности взрывчатых веществ в настоящем исследовании использованы натурные измерения параметров проветривания и выноса газов при полном технологическом цикле для условий трех различных тупиковых очистных камер. Полный технологический цикл подразумевают отбойку руды посредством взрывных работ, проветривание и дальнейшую уборку горной массы погрузочно-доставочными машинами на дистанционном управлении. Все представленные горные выработки проветриваются нагнетательным способом с помощью вентиляционного трубопровода и вентилятора местного проветривания, установленного на свежей сквозной струе воздуха. Вентиляционный трубопровод доводится до устья очистного пространства на расстояние не более 10 м. На рисунке 1 приведено схематичное пространственное изображение тупиковых очистных камер, в рамках которых произведены натурные измерения.

В ходе эксперимента фиксировались: расход воздуха в сквозной выработке; расход воздуха в поперечном сечении нарезной выработки (исходящая струя); скорость воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода; величины поперечных сечений нарезной и сквозной выработок. Характер разбавления и выноса вредных примесей определялся путем проведения динамических измерений с применением газоанализаторов. В каждой камере размещались два датчика, по одному на противоположных стенках нарезной выработки, в которую выносятся исходящая струя воздуха. Дополнительно проводился визуальный осмотр на предмет «запираания» очистного пространства камеры взорванной горной массой.

В ходе эксперимента фиксировались: расход воздуха в сквозной выработке; расход воздуха в поперечном сечении нарезной выработки (исходящая струя); скорость воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода; величины поперечных сечений нарезной и сквозной выработок. Характер разбавления и выноса вредных примесей определялся путем проведения динамических измерений с применением газоанализаторов. В каждой камере размещались два датчика, по одному на противоположных стенках нарезной выработки, в которую выносятся исходящая струя воздуха. Дополнительно проводился визуальный осмотр на предмет «запираания» очистного пространства камеры взорванной горной массой.

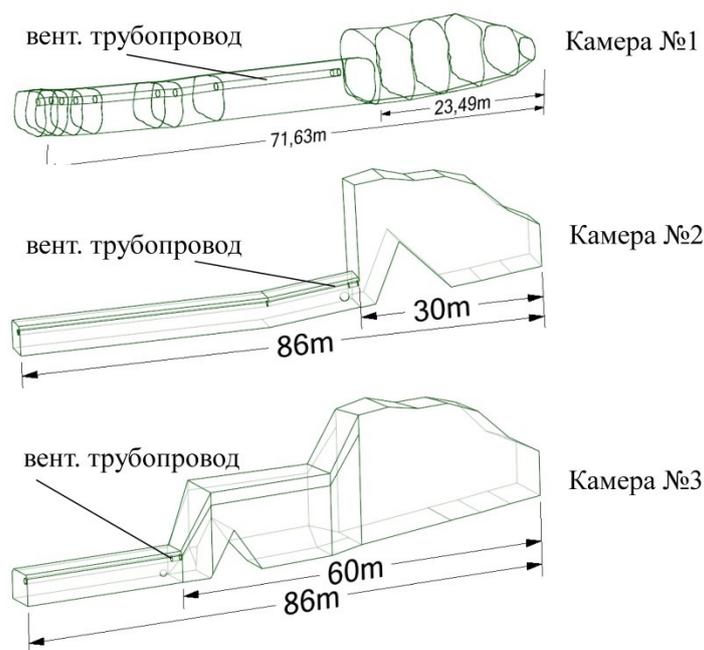


Рис. 1. Схематичное пространственное изображение тупиковых очистных камер

#### Параметры, зафиксированные в ходе эксперимента.

- Камера № 1. Длина камерного пространства – 23,5 м, общая длина – 71,6 м. Количество взорванного ВВ составляет 500 кг. Взрыв произведен в 15:15, время начала проветривания – 15:45. Количество воздуха, поступающего на проветривание – 13,3 м<sup>3</sup>/с.
- Камера № 2. Длина камерного пространства – 30 м, общая длина – 86 м. Количество взорванного ВВ составляет 2000 кг. Взрыв произведен в 19:15, время начала проветривания – 21:26. Количество воздуха, поступающего на проветривание – 9,25 м<sup>3</sup>/с.
- Камера № 3. Длина камерного пространства – 60 м, общая длина – 86 м. Количество взорванного ВВ составляет 500 кг. Взрыв произведен в 19:15, время начала проветривания – 21:57. Количество воздуха, поступающего на проветривание – 8,38 м<sup>3</sup>/с.

Для всех случаев натуральных измерений начало проветривания осуществлялось после размещения датчиков. Таким образом, можно косвенно судить, что весь остаточный газ был вынесен за время проведения экспериментов. До начала проветривания выносятся малая часть образующегося объема газов из пространства нарезной выработки за счет диффузии.

При проведении эксперимента фиксировался следующий перечень газов: CO, NO, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. Однако наблюдались только остаточные концентрации оксида азота (CO). Остальные газы либо отсутствовали, либо были в пределах 10% от предельно-допустимой концентрации. Концентрация кислорода на протяжении измерений составляла 20,9%. На рисунке 2 представлены графики выноса концентрации оксида углерода из очистных тупиковых камер № 1, № 2 и № 3. Показания разных датчиков на графиках выделены разными цветами (оранжевый, синий).

На рисунке 2 отмечены также области времени, в рамках которого производится вынос газов от взрывных работ. Время окончания выноса соответствует выходу графиков на постоянные значения.

Теоретическое количество газов, выделившегося при взрыве, составляет 11 м<sup>3</sup>, 44 м<sup>3</sup> и 11 м<sup>3</sup> для камер № 1, № 2 и № 3, соответственно (газовость применяемого ВВ по оксиду углерода равняется 22 л/кг).

Тогда как средний интегральный показатель количества оксида углерода, определенный по результатам динамических измерений, составляет для камеры № 1 – 2,67 м<sup>3</sup>, для камеры № 2 – 9,40 м<sup>3</sup>, для камеры № 3 – 1,90 м<sup>3</sup>.

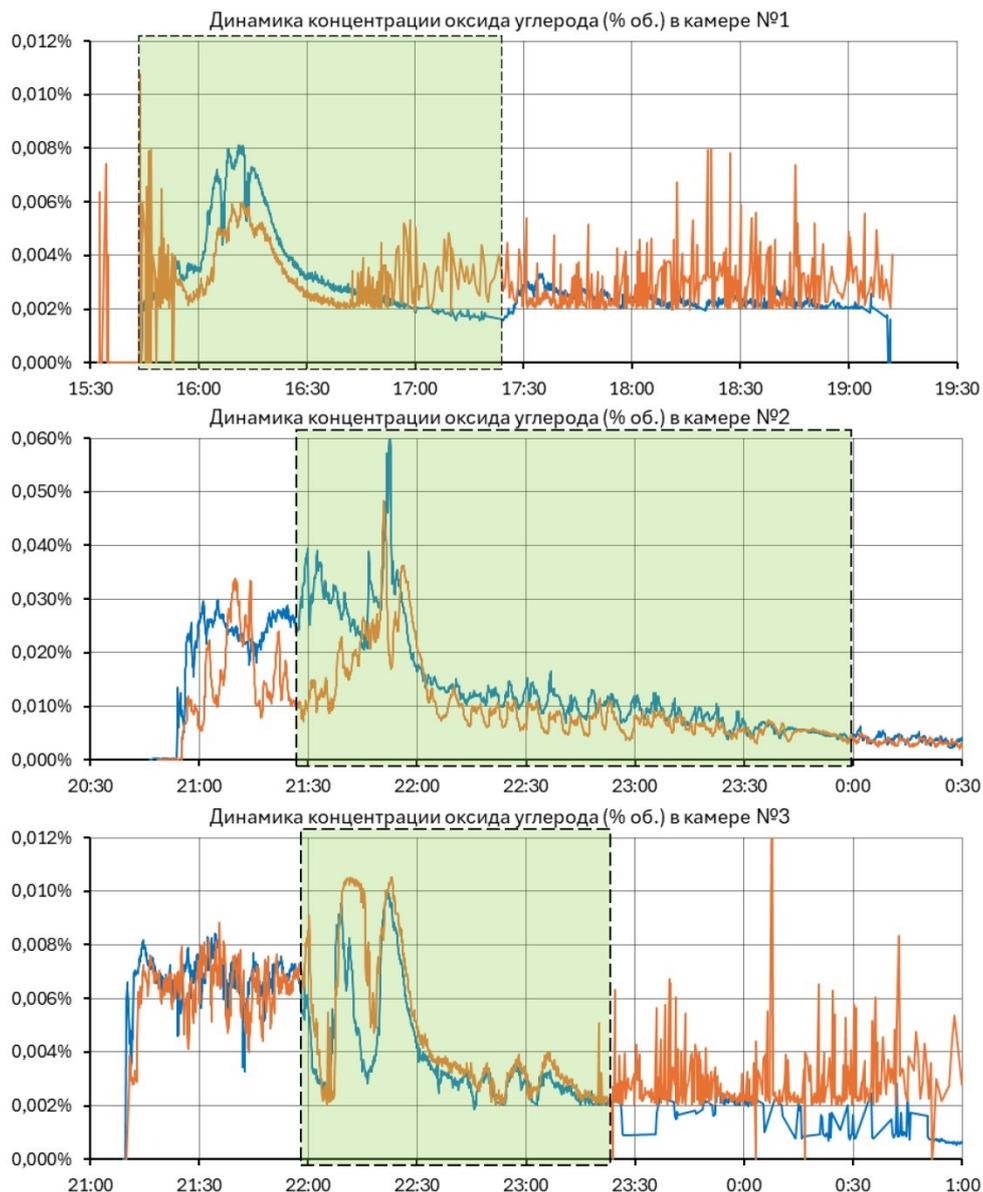


Рис. 2. График выноса оксида углерода из камер № 1, № 2 и № 3

Интегральный показатель количества оксида углерода ( $m^3$ ) определяется следующим образом [9]:

$$V_{CO} = \int \varphi_{CO}(t) \cdot Q dt,$$

где  $\varphi_{CO}$  – средняя концентрация газа,  $m^3/m^3$ ;  $Q$  – количество воздуха, поступающего на проветривание,  $m^3/c$ ;  $t$  – время выноса, с.

Таким образом, процентное соотношение фактически выделившегося газа к расчетному составляет: 25,88%, 25,32% и 17,93% для камер № 1, № 2 и № 3, соответственно.

Необходимо отметить, что в условиях камеры № 1 с момента взрыва до начала проветривания прошло порядка 30 минут, в условиях камеры № 2 – порядка 70 минут, в условиях камеры № 3 – порядка 170 минут. Что может вносить погрешность в определение фактического газовыделения.

На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлено существенное расхождение между паспортными (теоретическими) и фактическими показателями газовой взрывчатых веществ (ВВ) по оксиду углеро-

да. В ходе натуральных экспериментов в трех очистных камерах фактический объем выделившегося оксида углерода составил 17-26% от расчетного значения, основанного на паспортной газовости (22 л/кг).

2. Более низкое количество выделившихся газов отчасти может объясняться как особенностями используемого для измерения оборудования (процедура временного усреднения и пр.), так и некоторой неоднородностью распределения концентраций газов по высоте камерного пространства. Однако эти факторы могут быть значимы только на относительно коротком временном промежутке проветривания, когда временная зависимость концентрации быстро меняется по времени, однако по мере «выполаживания» временной зависимости концентрации эти факторы не являются значимыми.
3. Практическая значимость работы заключается в том, что при численном моделировании процесса проветривания начальное газораспределение должно задаваться исходя из соотношения теоретически рассчитанного объема выделившегося газа (на основании количества взрывчатого вещества и его газовости по вредным компонентам) и объема выработки. При этом предварительные эксперименты показывают, что выделяется лишь 30% объема газа от теоретического значения. Для оценки величины указанного соотношения необходимо проведение подобных экспериментов для различных горно-геологических и горнотехнических условий.

Данное направление исследований является перспективным, поскольку появляется возможность для существенной оптимизации процесса проветривания тупиковых выработок после взрывных работ: в будущем это может позволить снизить требуемый расход воздуха и(или) сократить нормативное время проветривания выработок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang J., Xue Y., Xiao J., Shi D. Diffusion characteristics of airflow and CO in the dead-end tunnel with different ventilation parameters after tunneling blasting // ACS Omega. – 2023. – V. 8, № 39. – P. 36269-36283. – DOI: 10.1021/acsomega.3c04819.
2. Fu S., Liu Z., Qiu J., Yang S., Oiao G., An G. Study of harmful gas migration law and influencing factors after tunnel blasting in high-altitude tunnels under push ventilation conditions // Scientific Reports. – 2025. – № 15. – номер статьи 8785. – DOI: 10.1038/s41598-025-93480-w.
3. Bai J., Wu Z., Chen T., Li W., Zhang P., Li Y. Influence of Ventilation Duct Parameter Optimization on Pollutant Diffusion in Spiral Tunnels // Sustainability. – 2022. – V. 14, № 17. – номер статьи 10540. – DOI: 10.3390/su141710540.
4. Liu J., Zhao H., Wang W., Zhou H., Lu F., Wan L., Luo X., Teng L. CO Diffusion Study and Spatial and Temporal Variation Modeling during the Construction Period of the Plateau Railroad Tunnel // ACS Omega. – 2023. – V. 8, № 45. – P.42565-42575. – DOI: 10.1021/acsomega.3c05280.
5. Chang X., Ren J., Yang R., Tong Y. Study on tunnel ventilation and pollutant diffusion mechanism during construction period // PLoS One. – 2025. – V. 20, № 5. – DOI: 10.1371/journal.pone.0322984.
6. Menéndez J., Sanabria M., Fernández-Oro J.M., Galdo-Vega M., Álvarez de Prado L., Bernardo-Sánchez A. Energy consumption and dilution of toxic gases in underground infrastructures: A case study in a railway tunnel under forced ventilation // Energy. – 2024. – V. 307. – номер статьи 132810. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.132810.
7. Козырев С.А., Власова Е.А. Газовая вредность взрывчатых веществ, применяемых в горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. – 2021. – № 5. – С.106–111. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-106-111.
8. Паршаков О.С., Зайцев А.В., Нестеров Е.А., Андрейко С.С. Комплексное исследование газовой обстановки рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 2. – С. 5-29. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_2\_0\_5.
9. Olkhovskiy D.V., Parshakov O.S., Bublik S.A. Study of gas hazard pattern in underground workings after blasting // Mining Science and Technology (Russian Federation). – 2023. – V. 8, № 1. – P. 47-58. – DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.
10. Maltsev S., Kozunin I., Semin M., Levin L. Practical justification for the diffusion-based ventilation of large cross-section dead-end chambers // Mathematical modelling of engineering problems. – 2025. – V. 12, № 5. – P. 1535-1543. – DOI: 10.18280/mmep.120507.
11. Шевченко Л.А., Костеренко В.Н., Смирнов О.В. Аэрология горных предприятий: учеб. пособие. – М.: Горная книга, 2020. – 218 с.: ил.