

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ СТАЦИОНАРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.А. Чукарева<sup>1</sup>, Д.И. Михеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева  
(РХТУ им. Д.И. Менделеева), Москва, Россия, e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru

**Аннотация:** В Российской Федерации для оценки выбросов загрязняющих веществ допускается использование методик, входящих в перечень одобренных Министерством природных ресурсов и экологии. Проведен анализ некоторых внесенных в перечень методик расчета выбросов (вредных) загрязняющих веществ в результате проведения буровзрывных работ при добыче полезных ископаемых. Полученные результаты оценки сопоставлены с некоторыми опубликованными результатами экспериментальных исследований продуктов взрыва ряда промышленных взрывчатых составов отечественных и зарубежных ученых. Выявлены и проанализированы отклонения результатов расчетных методов от экспериментально полученных значений. Проанализированы изменения содержания основных газообразных продуктов взрыва в зависимости от прошедшего времени с момента взрыва. Показана важность учета прошедшего с момента взрыва времени при отборе проб газовых продуктов взрыва. По результатам исследования динамики изменений содержания оксидов азота в атмосферном воздухе после проведения взрывных работ с учетом реакций их обращения в атмосферном воздухе предложено несколько подходов для учета фактических выбросов. Полноценный учет образующихся оксидов азота предлагается вести посредством расчета исходного выброса диоксида азота на основе динамики его преобразования или учета дополнительного компонента выброса – азотной кислоты.

**Ключевые слова:** выбросы, оксид углерода, оксиды азота, методика оценки выбросов, взрывные работы, газообразные продукты взрыва, промышленные взрывчатые вещества, загрязняющие вещества, добыча полезных ископаемых.

**Для цитирования:** Чукарева А. А., Михеев Д. И. Анализ и оптимизация методов расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу стационарными источниками добывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 95–107. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_3\_0\_95.

### Analysis and optimization of calculation methods for emissions of air pollutants by stationary sources in mineral mining industry

A.A. Chukareva<sup>1</sup>, D.I. Mikheev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
(Mendeleev University of Chemical Technology), Moscow, Russia, e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru

---

**Abstract:** In the Russian Federation it is authorized to evaluate pollutant emissions using procedures from the approved list of the Ministry of Natural Resources and Environment. Some of the procedures enrolled on the list for the calculation of harmful emissions of pollutants during drilling and blasting in mineral mining are analyzed in the article. The calculated results are compared with the published data obtained in experimental investigations of explosion products of some industrial explosives by domestic and foreign researchers. The deviation of the calculated results from the experimental values are revealed and studied. The change in the content of the main explosion gases is examined as function of time past from the moment of an explosion. It is pointed at the importance of taking into account the time past from the moment of an explosion when sampling explosion gases. From the research findings on the dynamics of changes in air content of nitrogen oxides after execution of blasting operations, with regard to their reactions in air, a few approaches are proposed for the calculation of actual emissions. It is suggested to carry out full registering of nitrogen oxides formed in blasting by calculating initial emission of nitrogen dioxide based on its transformation dynamics, or by taking into account an additional emission component—nitric acid.

**Key words:** emissions, carbon oxide, nitrogen oxides, emission evaluation procedure, blasting operation, explosion gases, industrial explosives, pollutants, mineral mining.

**For citation:** Chukareva A. A., Mikheev D. I. Analysis and optimization of calculation methods for emissions of air pollutants by stationary sources in mineral mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):95-107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_3\_0\_95.

---

### Актуальность проблемы

Проблема загрязнения воздуха с каждым годом становится все актуальнее. В России ведется глобальная работа на всех уровнях в части обеспечения снижения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду и их квотирования.

Государственные доклады «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» Минприроды России свидетельствуют о тенденции к снижению суммарных объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников. На рис. 1 представлена сравнительная диаграмма объемов выбросов от основных стационарных источников за 2020 – 2022 гг.

Единственной причиной снижения суммарных объемов выбросов можно назвать резкое падение показателей выбросов обрабатывающих производств, связанное в первую очередь с исключением

из статистики объемов загрязнителей, уловленных предприятиями. При этом иные области экономической деятельности зачастую демонстрируют незначительные колебания выбросов, кроме добычи полезных ископаемых, показавшей выраженный прирост в последние годы.

Согласно постановлению Правительства Российской Федерации, для расчета объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников могут быть использованы только методики, включенные в перечень Минприроды РФ. На 2024 г. в перечне представлены 123 методики, 20 из которых допущены для расчета выбросов при добыче полезных ископаемых: 7 методик применяются при добыче нефти и газа; 13 методик — при добыче твердых полезных ископаемых, 11 из них направлены на учет выбросов загрязняющих веществ, преимущественно образующихся при проведении взрыв-

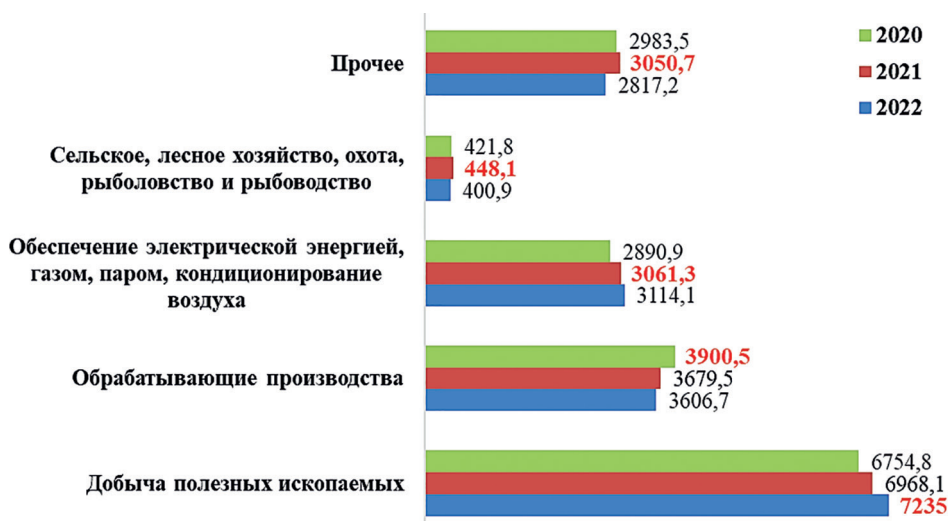


Рис. 1. Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников по видам экономической деятельности, тыс. т

Fig. 1. Emissions of air pollutants from stationary sources by types of economic activity, kt

ных работ — оксидов азота, монооксида углерода, взвешенных веществ и, в ряде методик, иных соединений.

### Объекты исследования

Основные газообразные продукты взрыва промышленных взрывчатых веществ (ВВ) — монооксид углерода и оксиды азота [1–3], выбросы которых подлежат обязательному учету и подаче сведений в Федеральную службу по надзору в сфере природопользования.

На рис. 2 представлены результаты анализа статистической отчетности Росприроднадзора об охране атмосферного

воздуха по форме 2-ТП (воздух) в части данных по выбросам этих газов при добыче твердых полезных ископаемых за 2020–2022 гг.

Для обоих веществ наблюдается стабильный пропорциональный рост выбросов, составляющий в части монооксида углерода около 40% от всех выбросов вещества по отрасли и около 59% в части оксидов азота.

Сведения Росприроднадзора формируются на основе результатов оценки по методикам, представленным в перечне Минприроды. Ряд методик, находящихся в свободном доступе, были проанализи-

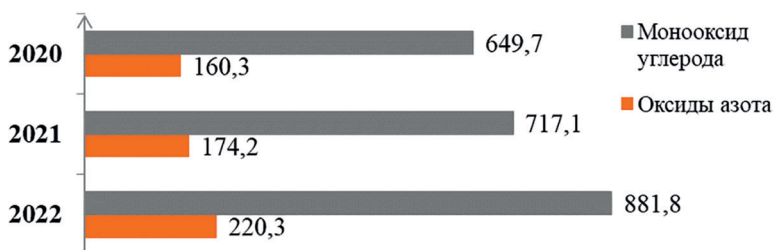


Рис. 2. Объем выбросов CO и NO<sub>x</sub> в атмосферный воздух от стационарных источников добычи твердых полезных ископаемых, тыс. т

Fig. 2. Emissions of CO and NO<sub>x</sub> in air from stationary sources in solid mineral mining, kt

Таблица 1

**Рассмотренные методики расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками в добывающей отрасли**  
**Check list of calculation methods for air emissions of harmful pollutants from stationary sources in mineral mining industry**

№	№ по перечню	Наименование методики	Перечень вредных (загрязняющих) веществ, показатели выбросов которых рассчитываются по данной методике расчета	Сведения о разработчике
M1	55	Методические указания по расчету неорганизованных выбросов пыли и вредных газов в атмосферу при взрывных работах на карьерах горнохимических предприятий. Люберцы, 1987	Оксись углерода Пыль Оксиды азота	Государственный институт горнохимического сырья (ГИГХС), 140000, г. Люберцы, Московской области, Октябрьский пр., 259
M2	56	Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). Люберцы, 1999	Пыль Оксид углерода Оксиды азота Углеводороды	Институт горного дела им. А. А. Скочинского, 140004, г. Люберцы, Московской обл.
M3	58	Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ при взрывании порэмита на карьерах комбината «Урал-асбест». Асбест, 1997	Взвешенные вещества Оксид углерода Оксиды азота	АО «НИИПроектаСбест», Свердловская обл., г. Асбест, ул. Промышленная, 7
M4	59	Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от неорганизованных источников для предприятий НПО «Якуталмаз». Мирный, 1993	Оксись углерода Сернистый ангидрид Двуокись азота и иные загрязняющие вещества, указанные в методике	Якутский научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности (Якуталмаз), Республика Саха, г. Мирный, ул. Ленина, 39
M5	110	Методические указания по определению количественного состава вредных продуктов, образующихся при взрыве и горении. Дзержинск, 2005	Диоксид азота Оксид углерода Сажа Диоксид серы Взвешенные вещества	ОАО «Промсинтез», 446100, Самарская область, г. Чапаевск, ул. Куйбышева, 1
M6	108	Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессах горного производства на предприятиях угольной промышленности. Пермь, 2014	Пыль угольная Пыль неорганическая: 70–20% диоксида кремния Пыль неорганическая: ниже 20% двуокиси кремния Твердые частицы при сжигании угля в топливосжигающих установках (летучая зола и коксовые остатки) Оксиды азота Оксид углерода Сера диоксид Углерод (сажа) Бенз(а)пирен	Межотраслевой научно-исследовательский и проектно-технологический институт экологии топливно-энергетического комплекса (ОАО «МНИИЭКО ТЭК»), 614007, Пермский край, г. Пермь, ул. Н. Островского, 60

зированы согласно правилам их разработки и утверждения.

В табл. 1 представлены основные сведения о методиках.

Анализ методики М1 показал, что в расчетах применяются эмпирические данные о показателях удельного выделения окиси углерода и окислов азота по данным Минуглепрома СССР ВНИИОСуголь 1984 г. с учетом количества взорванного вещества и эффективности применяемых средств пылегазоподавления, позволяющие получить искомые значения выбросов СО и NO.

В методике М2 используются те же эмпирические значения удельного содержания вредных газов в 1 кг ВВ, количество взрываемого ВВ и переводной коэффициент, зависящий от определяемого вредного газа. Этой методикой, в отличие от других рассмотренных, учитывается поглощение вредных газов породой, что является прогрессивным решением с учетом ранее опубликованных анализов сорбции газов [4]. Результаты расчета представлены значениями выбросов СО и NO<sub>x</sub>.

Алгоритмы расчета в методике М3 идентичны М1, за исключением появления не имеющей описания в методике переменной, что делает невозможным проведение расчета.

Методика М4 использует аналогичные методике М1 данные, но с учетом коэффициента гравитационного оседания вредного вещества в пределах карьера.

Методикой М5 используются данные о составе взрывчатого вещества и его брутто-формула с учетом коэффициентов влияния однородности смеси, избытка кислорода и плотности образца ВВ. Судя по прилагаемой литературе, методика основана на представлениях о кинетике химических преобразований вещества в процессе взрывного превращения. Результатом расчета по данной

модели являются значения выбросов СО и NO<sub>2</sub>.

В основу алгоритма и удельных показателей методики М6 положены подходы и эмпирические значения удельного объема вредных газов, выделяемых при взрыве 1 т ВВ, учитывающие количество взорванного вещества и эффективность применяемых средств пылегазоподавления, идентичные используемым в М2.

Рассмотренные методики, за исключением М6, подверглись сравнительному анализу с привлечением экспериментальных данных [5, 6] и подробно изложены в [7]. В некоторых опубликованных экспериментальных данных не указывается время отбора газовой пробы после проведения взрыва, что, с учетом нижеследующих положений, затрудняет корректный сравнительный анализ.

### **Динамика изменения содержания основных продуктов взрыва**

По результатам экспериментальных исследований содержания вредных газов, в зависимости от времени отбора пробы после взрыва наблюдается выраженное снижение содержания оксидов азота и несколько менее значительное снижение для монооксида углерода с увеличением времени, прошедшего после образования продуктов взрыва. В ходе исследования [8] проводилась серия отборов проб из герметичной стальной камеры с внутренним объемом 7 м<sup>3</sup> с последующим пересчетом до получения удельного содержания токсичных газов на весовую единицу ВВ к моментам времени 1, 5, 30, 120 и 1440 мин после взрыва. Продукты взрыва поступали в камеру непосредственно из стальной mortarы, в которой производился подрыв зарядов исследуемых ПВВ массой до 1 кг. Результаты экспериментов [8] проиллюстрированы рис. 3 и 4.

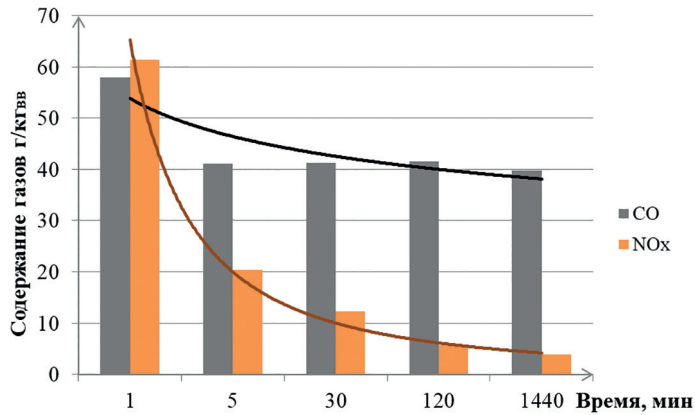


Рис. 3. Изменение во времени удельного содержания токсичных газов после взрыва Граммонита 79/21  
 Fig. 3. Time change in specific emissions of toxic gases after explosion of Grammonite 79/21

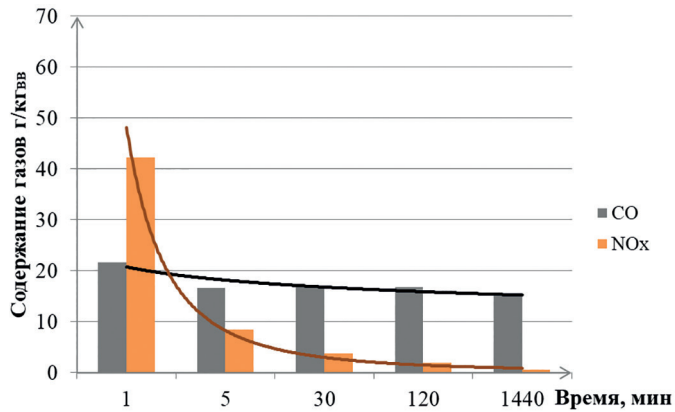


Рис. 4. Изменение во времени удельного содержания токсичных газов после взрыва Аммонита № 6 ЖВ  
 Fig. 4. Time change in specific emissions of toxic gases after explosion of Ammonite 6ZHВ

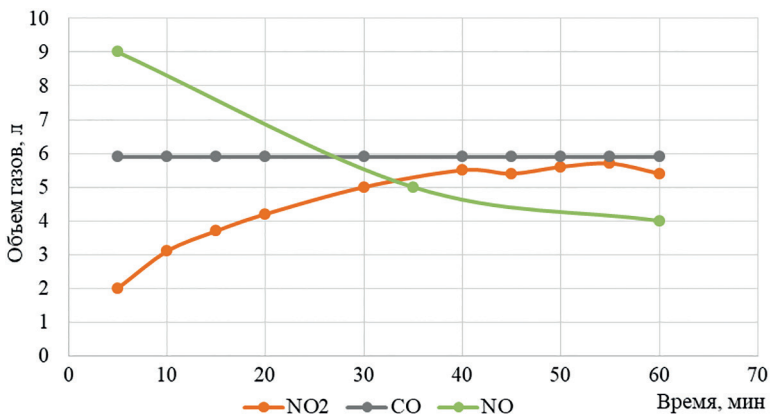


Рис. 5. Изменение во времени объема токсичных газов после взрыва АСДТ (5,4% ДТ)  
 Fig. 5. Time change in volume of toxic gases after explosion of ANFO (5.4% of fuel oil)

Автор исследования объясняет это реакцией газов с водой, как находящейся в воздухе изначально, так и образованной в результате взрывного превращения, а также сорбцией на поверхностях взрывной камеры. Подробности о процедуре отбора проб и определении начального удельного выброса авторами [8], к сожалению, не приводятся. В экспериментальной части наших исследований в настоящий момент мы наблюдаем схожие эффекты динамики изменения содержания оксидов азота в отобранных пробах.

На рис. 5 представлены результаты анализа продуктов взрыва для АСДТ-смеси (5,4% ДТ), выполненного электрохимическими газоанализаторами [9].

Авторы данного исследования регистрируют рост содержания диоксида азота во времени. Однако эти результаты не только не диссонируют с описанными выше, а скорее дополнительно подтверждают их. Электрохимические методы того времени практически неизбежны относительно диоксида азота и нитрат аниона, формируя аналитический сигнал на основе концентраций, в том числе нитрат аниона, в отличие от используемого в [8] фотометрического метода, в котором реактив Грисса обеспечивает четкое разделение диоксида и нитрата. Таким образом, результаты [9] подчеркивают сложности «полевой» оценки выбросов, необходимость тщательного подхода к газоанализу. Стоит заметить, что фотометрический метод

также не точен для абсолютной оценки ввиду сложностей обеспечения полноценной сорбции поглотительными растворами.

### Особенности преобразования оксидов азота

На рис. 6 представлено образование и последующие превращения оксидов азота посредством условных результирующих реакций [10].

R1 представляет упрощенную реакцию образования оксидов азота из условного промышленного ВВ с брутто формулой вида  $CHNO$  без учета остальных продуктов в результате взрывного превращения.

За один акт синтеза азотной кислоты, представленной реакцией R3, при условии полной сорбции  $NO_2$  около 78% массы диоксида переходит в  $HNO_3$ . Оставшийся в ходе реакций R1 и R3 монооксид азота подвергается окислению [11, 12] по R2 и может участвовать в последующих актах синтеза азотной кислоты. Таким образом, все количество образовавшихся оксидов азота гипотетически может преобразоваться в азотную кислоту [13, 14].

На рис. 7 и 8 представлена динамика изменений содержания  $NO_2$  в экспериментах Ю.В. Варнакова [8], с расчетом промежуточных значений методом линейной интерполяции.

При детальном рассмотрении наблюдается корреляция с теоретическими массами сорбции диоксида азота, при

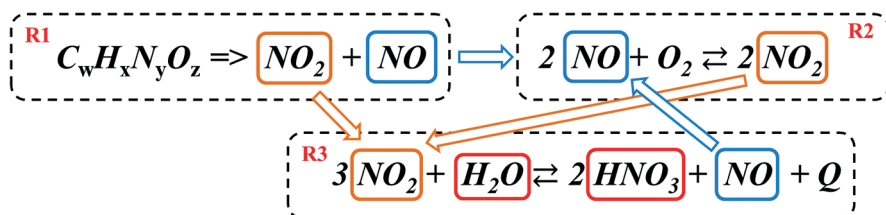


Рис. 6. Схема превращения оксидов азота посредством условных результирующих реакций  
Fig. 6. Schematic transformation of nitrogen oxides in conventional composite reactions

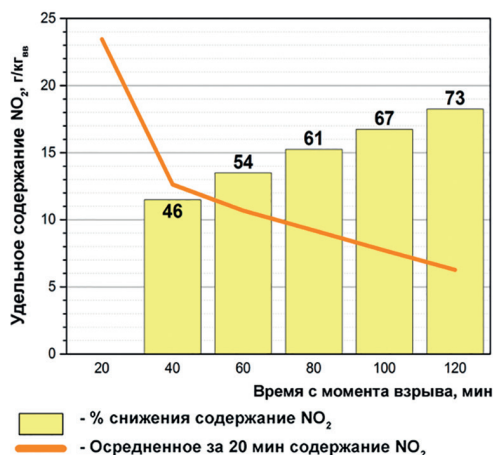


Рис. 7. Изменение во времени содержания диоксида азота после взрыва Граммонита 79/21

Fig. 7. Time change in content of nitrogen dioxide after explosion of Grammonite 79/21

достижении 100–120-минутного интервала времени с момента проведения взрыва.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты расчетов выбросов оксидов азота по методикам М1, М2, М4, М5 и интерполяции экспериментальных данных, для АСДТ значение конечного содержания на интервале 100–120 мин получено экстраполяцией от последнего экспериментального значения (последнее измерение через 60 мин после взрыва).

Таблица 2

**Результаты расчета выбросов оксидов азота по методикам М1, М2, М4, М5 в сравнении с экспериментальными данными**  
**Comparison of experimental data and calculations of emission of nitrogen oxides using methods M1, M2, M4 and M5**

Удельные выбросы диоксида азота, г/кг <sub>вв</sub>							
ПВВ	Экспериментальные		Расчетные по методикам				
	исходный, 0–20 мин	конечный, 100–120 мин	М1	М2	М4	М5	М6
Аммонит № 6 ЖВ	11,41	2,07	2,60	–	2,60	17,13	14,0
Граммонит	23,45	6,27	2,60	5,73	2,60	17,13	14,0
АСДТ (5,4% ДТ)	18,48	3,50*	2,93	9,80	2,93	38,80	11,0

\* Значение получено экстраполяцией.



Рис. 8. Изменение во времени содержания токсичных газов после взрыва Аммонита № 6 ЖВ

Fig. 8. Time change in content of toxic gases after explosion of Ammonite 6ZHВ

Поскольку в рассмотренных методиках не указывается момент отбора проб при получении опорных эмпирических значений, процент поглощения диоксида азота к моменту достижения этих значений оценивался относительно имеющихся экспериментальных данных [8, 9]. На рис. 9 представлена диаграмма снижения содержания диоксида азота для типовых промышленных ВВ через 120 мин после взрыва.

Исходя из подобного анализа, степень снижения содержания диоксида



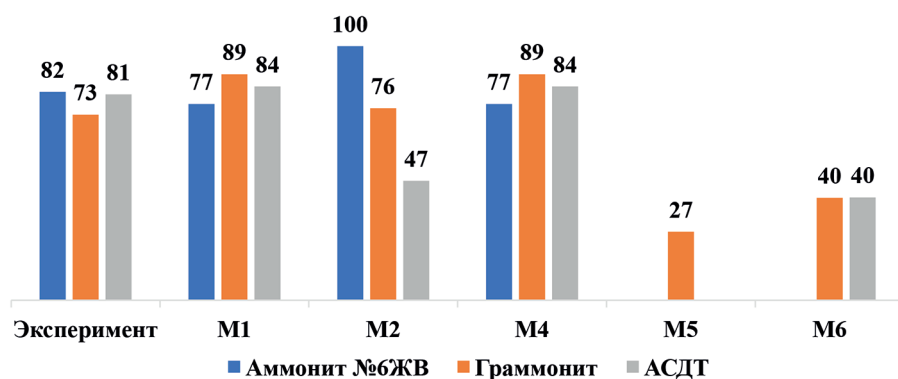


Рис. 9. Процентное снижение содержания  $\text{NO}_2$  через 120 мин после взрыва  
 Fig. 9. Percent drop in  $\text{NO}_2$  content 120 min after explosion

азота имеет высокую сходимость с теоретической степенью сорбции диоксида азота водой, что, учитывая эмпирическую природу исходных данных, указывает на высокую вероятность именно этого пути преобразования оксидов азота. В настоящее время в РХТУ им. Менделеева ведутся экспериментальные исследования в этом направлении [15].

Значительные отклонения результатов расчета от экспериментальных данных наблюдаются с применением методики М5. Данная методика требует более детального анализа алгоритма расчета в части времени, прошедшего с момента взрыва в используемых исходных данных. Расчетные значения загрязняющих продуктов взрыва, получаемые с помощью программных продуктов «Real» и «Shock and Detonation» или с применением других расчетных методов, основанных на сведениях о термодинамическом равновесии продуктов взрывных реакций, также показывают значительные расхождения с экспериментальными данными [16, 17]. Причиной подобного расхождения, вероятно, также является динамический характер преобразования оксидов азота, что указывает на высокую важность учета времени отбора проб [18], используемых для опорных эмпирических данных.

По результатам исследования динамики изменений содержания оксидов азота в продуктах взрыва после проведения взрывных работ, а также реакций обращения их в атмосферном воздухе для учета фактических выбросов диоксида азота или выбросов с учетом его преобразований предлагаются следующие подходы:

Расчет исходного выброса диоксида азота  $m_{\text{исх}}(\text{NO}_2)$  на основе динамики его преобразования во времени с момента взрыва.

$$m_{\text{исх}}(\text{NO}_2) = (m_{\text{расч}}(\text{NO}_2)) / (1 - S), \quad (1)$$

где  $m_{\text{исх}}(\text{NO}_2)$  – масса исходного выброса диоксида азота, т;  $m_{\text{расч}}(\text{NO}_2)$  – расчетная масса выброса диоксида азота по методикам, т;  $S$  – доля поглощенного (сорбированного)  $\text{NO}_2$ .

Учет выброса образующейся азотной кислоты  $m(\text{HNO}_3)$ :

$$m(\text{HNO}_3) = 1,37 \cdot (m_{\text{расч}}(\text{NO}_2) / (1 - S) - m_{\text{расч}}(\text{NO}_2)), \quad (2)$$

где  $m(\text{HNO}_3)$  – масса выброса азотной кислоты, т;  $S$  – доля поглощенного (сорбированного)  $\text{NO}_2$ ; 1,37 – коэффициент прироста массы в ходе преобразования диоксида азота в азотную кислоту, равный соотношению молекулярных масс  $\text{Mr}(\text{HNO}_3) / \text{Mr}(\text{NO}_2)$ .

При расчете выброса образующейся азотной кислоты применим учет гравитационного оседания ее аэрозоля в пределах стационарного источника выброса, однако значение коэффициента, используемого для подобного учета, требует отдельной оценки в каждом конкретном случае.

В обоих случаях в основе расчета исходного выброса лежит линейная экстраполяция, поскольку для достижения начального значения выброса динамика изменения содержания во времени не представляет значительного интереса. Ключевым показателем является доля сорбированного водой диоксида азота. Данный показатель зависит от достаточно большого количества факторов, однако лабораторные методы вполне позволяют получить достаточно точные значения, которые можно использовать в качестве опорных.

Значение  $S$  [доли поглощенного (сорбированного)  $\text{NO}_2$ ] может быть установлено экспериментально или, в качестве временного решения, принято равным теоретическому максимуму одного акта синтеза, составляющему 0,78. При использовании гидрозабойки с учетом дополнительного поглощения 85% оставшихся оксидов азота значение  $S$  повышается до 0,967.

Использование теоретического максимума одного акта синтеза является частным временным решением, относительно корректно отражающим известные экспериментальные результаты отдельных видов промышленных ВВ. Описанные выше реакции R2 и R3 происходят хаотично и параллельно, что потенциально может привести к полной сорбции оксидов азота.

При экспериментальном определении  $S$  необходимо учитывать: тип ПВВ и детонационный режим, время отбора пробы с момента взрыва, температурный режим и влажность продуктов взрыва

и окружающей среды, а также другие потенциально значимые факторы. Подобные экспериментальные исследования практически не реализуемы на местах применения ПВВ и фактически сводятся к целевым лабораторным исследованиям. Широко применяемый фотометрический метод с реактивом Грисса не всегда позволяет полноценно учесть объемы выбросов оксидов без дополнительного контроля степени поглощения при отборе проб и требуют параллельных методов контроля или специальных измерений продуктов взрыва, изолированных от контакта с окружающей средой [19, 20].

Подходы к пересчету выброса, представленные выше, не распространяются на корректировку результатов методики М5 ввиду особенностей, используемых в ее алгоритме исходных данных.

### **Заключение**

Большинство рассмотренных методик основывается на экспериментальных данных о выбросах более чем 30-летней давности и требуют как минимум обновления опорных справочных данных.

Исходя из данных о химических превращениях оксидов азота в атмосфере, подтверждаемых экспериментальными наблюдениями за динамикой содержания  $\text{NO}_2$  в продуктах взрыва начиная с момента взрыва, значительная часть диоксида азота сорбируется водой с образованием аэрозоля азотной кислоты. Высокая влажность породы или использование гидрозабойки способствуют повышению перехода диоксида азота в азотную кислоту.

Представлены подходы к оптимизации учета выбросов оксидов азота при расчетах выбросов добывающей промышленности от взрывных работ с учетом динамического изменения содержания  $\text{NO}_2$  с момента взрыва и его сорбции водой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Banasiewicz A.* Analysis of historical changes in the limit value of nitrogen oxides concentrations for underground mining // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012018.
2. *Rowland J., Mainiero R., Donald A. Jr.* Factors affecting fumes production of an emulsion and ANFO/Emulsion blends // Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technology, vol. 2, Cleveland, 2001, pp. 133 – 141.
3. *Hartami P. N., Maulana Y., Purwiyono T. T., Tuheteru E. J., Kusumo D. H., Putra D., Burhanuddin M.* An analysis of blasthole condition towards // Toxic Fumes Generation from Blasting Activities in Surface Mine. 2023, vol. 1175, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1175/1/012003.
4. *Гагауз Ф. Г., Дребница А. В.* Состав и количество ядовитых газов при взрывных работах в подземных горных выработках // Взрывное дело. – 1970. – № 68/25. – С. 19 – 23.
5. *Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Пугачев С. С., Михайлов А. Л.* Экспериментальное определение газовой вредности современных промышленных ВВ // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 2. – С. 40 – 43.
6. *Доманов В. П., Варнаков Ю. В., Батраков Д. Н., Плешаков К. А., Варнаков К. Ю.* Исследования газовой вредности взрывчатых веществ, предназначенных для формирования скважинных зарядов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 51 – 57.
7. *Чукарева А. А., Михеев Д. И.* Сравнительный анализ методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками добывающей промышленности / V Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: материалы конференции. – М.: РХТУ, 2022. – С. 145 – 149.
8. *Варнаков Ю. В.* Разработка методов оценки безопасности и эффективности взрывчатых веществ для открытых горных работ: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.26.01. Кемерово, 2000. – 23 с.
9. *Persson G., Persson P. A.* Estimation of toxic fume characteristics of explosives from steel tube blasting // Propellants and Explosives. 1980, vol. 5, pp. 75 – 78.
10. *Oluwoye I., Dlugogorski B. Z., Gore J., Oskierski H. C., Altarawneh M.* Atmospheric emission of NO<sub>x</sub> from mining explosives. A critical review // Atmospheric Environment. 2017, vol. 167, pp. 81 – 96. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.006.
11. *Sapko M., Rowland J., Mainiero R., Zlochower I.* Chemical and physical factors that influence NO<sub>x</sub> production during blasting: Exploratory Study / Proceedings of 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Cleveland, 2002.
12. *Wieland M. S.* Work-principle model for predicting toxic fumes of nonideal explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2004, vol. 29, pp. 236 – 243.
13. *Azarkovich A. E., Bolkhovitinov L. G., Pernik L. M.* Possibility of minimizing generation of nitrogen oxides in blasting of ammonium nitrate explosives // Journal of Mining Science. 1995, vol. 31, pp. 147 – 151.
14. *Katsabanis P. D., Taylor K.* Toxicity of blasting fumes as a function of time after blasting / Rock Fragmentation by Blasting. CRC Press, 2013, pp. 503 – 510. DOI: 10.1201/b13759-66.
15. *Султанов Е. В.* Метод оценки выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду при применении промышленных взрывчатых веществ // Химическая промышленность сегодня. – 2023. – № 4. – С. 30 – 36.
16. *Suceska M., Tumara B. S., Skrllec V., Stankovic S.* Prediction of concentration of toxic gases produced by detonation of commercial explosives by thermochemical equilibrium calculations // Defence Technology. 2022, vol. 18, pp. 2181 – 2189. DOI: 10.1016/j.dt.2021.10.011.
17. *Акинин Н. И., Гармашов А. С., Михеев Д. И.* Оценка экотоксичности продуктов взрыва промышленных взрывчатых веществ // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 36 – 40. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-36-40.
18. *Wojtas J., Bogdanowicz R., Kamienska Duda A., Pietrzyk B., Sobaszek M., Prasula P., Dettlaff A., Achtenberg K.* Fast-response optoelectronic detection of explosives' residues from the nitro- aromatic compounds detonation: field studies approach // Measurement. 2020, vol. 162. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107925.

19. Султанов Е. В., Булушев Д. А., Акинин Н. И. Количественное определение газовой вредности и содержания оксидов азота (II) в продуктах взрыва модельных промышленных составов на основе аммиачной селитры / V Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности. Материалы конференции. — М.: РХТУ, 2022. — С. 137—142.

20. Zawadzka-Małota I. Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products // Journal of Sustainable Mining. 2015, vol. 14, pp. 173—178. DOI: 10.1016/j.jsm.2015.12.003. **PLAB**

## REFERENCES

1. Banasiewicz A. Analysis of historical changes in the limit value of nitrogen oxides concentrations for underground mining. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012018.

2. Rowland J., Mainiero R., Donald A. Jr. Factors affecting fumes production of an emulsion and ANFO / Emulsion blends. *Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, vol. 2, Cleveland, 2001, pp. 133—141.

3. Hartami P. N., Maulana Y., Purwiyono T. T., Tuheteru E. J., Kusumo D. H., Putra D., Burhanuddin M. An analysis of blasthole condition towards. *Toxic Fumes Generation from Blasting Activities in Surface Mine*. 2023, vol. 1175, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1175/1/012003.

4. Gagauz F. G., Drebnitsa A. V. Composition and quantity of poisonous gases during blasting in underground mine workings. *Explosion technology*. 1970, no. 68/25, pp. 19—23. [In Russ].

5. Kozyrev S. A., Vlasova E. A., Sokolov A. V., Pugachev S. S., Mikhailov A. L. Experimental determination of the gas harmfulness of modern industrial explosives. *Occupational Safety in Industry*. 2008, no. 2, pp. 40—43. [In Russ].

6. Domanov V. P., Varnakov Yu. V., Batrakov D. N., Pleshakov K. A., Varnakov K. Yu. Studies of gas hazards of explosives intended for the formation of borehole charges. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2012, no. 2, pp. 51—57. [In Russ].

7. Chukareva A. A., Mikheev D. I. Comparative analysis of methods for calculating emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air by stationary sources of mining. *V Mezhduarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh po problemam tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy konferentsii* [V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists on the Problems of Technosphere Security: Conference proceedings], Moscow, 2022, pp. 145—149. [In Russ].

8. Varnakov Yu. V. *Razrabotka metodov otsenki bezopasnosti i effektivnosti vzryvchatykh veshchestv dlya otkrytykh gornykh rabot* [Development of methods for assessing the safety and effectiveness of explosives for open-pit mining], Candidate's thesis, Kemerovo, 2000, 23 p.

9. Persson G., Persson P. A. Estimation of toxic fume characteristics of explosives from steel tube blasting. *Propellants and Explosives*. 1980, vol. 5, pp. 75—78.

10. Oluwoye I., Dlugogorski B. Z., Gore J., Oskierski H. C., Altarawneh M. Atmospheric emission of NO<sub>x</sub> from mining explosives. A critical review. *Atmospheric Environment*. 2017, vol. 167, pp. 81—96. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.006.

11. Sapko M., Rowland J., Mainiero R., Zlochower I. Chemical and physical factors that influence NO<sub>x</sub> production during blasting: Exploratory Study. *Proceedings of 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*. Cleveland, 2002.

12. Wieland M. S. Work-principle model for predicting toxic fumes of nonideal explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2004, vol. 29, pp. 236—243.

13. Azarkovich A. E., Bolkhovitinov L. G., Pernik L. M. Possibility of minimizing generation of nitrogen oxides in blasting of ammonium nitrate explosives. *Journal of Mining Science*. 1995, vol. 31, pp. 147—151.

14. Katsabanis P. D., Taylor K. Toxicity of blasting fumes as a function of time after blasting. *Rock Fragmentation by Blasting*. CRC Press, 2013, pp. 503—510. DOI: 10.1201/b13759-66.

15. Sultanov E. V. Method for assessing emissions of pollutants into the environment when using industrial explosives. *Chemical industry today*. 2023, no. 4, pp. 30—36. [In Russ].

16. Sucasca M., Tumara B. S., Skrlec V., Stankovic S. Prediction of concentration of toxic gases produced by detonation of commercial explosives by thermochemical equilibrium calculations. *Defence Technology*. 2022, vol. 18, pp. 2181 – 2189. DOI: 10.1016/j.dt.2021.10.011.

17. Akinin N. I., Garmashov A. S., Mikheev D. I. Evaluation of ecotoxicity of products of explosion of industrial explosives. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 2, pp. 36 – 40. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-36-40.

18. Wojtas J., Bogdanowicz R., Kamienska Duda A., Pietrzyk B., Sobaszek M., Prasuka P., Dettlaff A., Achtenberg K. Fast-response optoelectronic detection of explosives' residues from the nitroaromatic compounds detonation: field studies approach. *Measurement*. 2020, vol. 162. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107925.

19. Sultanov E. V., Bulushev D. A., Akinin N. I. Quantitative determination of hazardous gas and content of nitrogen oxides (II) in explosion products of model industrial compositions based on ammonia nitrate. *V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh po problemam tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy konferentsii* [V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists on the Problems of Technosphere Security: Conference proceedings], Moscow, 2022, pp. 137 – 142. [In Russ].

20. Zawadzka-Małota I. Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products. *Journal of Sustainable Mining*. 2015, vol. 14, pp. 173 – 178. DOI: 10.1016/j.jsm.2015.12.003.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чукарева Анна Анатольевна<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru,  
Михеев Денис Иголеви<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: mikheev.d.i@muctr.ru,

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева).

**Для контактов:** Чукарева А.А., e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Chukareva<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru,  
D.I. Mikheev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor,

e-mail: mikheev.d.i@muctr.ru,

<sup>1</sup> Dmitry Mendeleev University  
of Chemical Technology of Russia  
(Mendeleev University of Chemical Technology),  
125047, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Chukareva, e-mail: ania.tchuckarewa@yandex.ru.

Получена редакцией 10.04.2023; получена после рецензии 06.11.2024; принята к печати 10.02.2025.

Received by the editors 10.04.2023; received after the review 06.11.2024; accepted for printing 10.02.2025.

