

УДК 622.807 © А.И. Деменков✉, Н.А. Белоносова, Н.И. Майбенко,
О.Г. Кременев, 2026

UDC 622.807 © A.I. Demenkov✉, N.A. Belonosova, N.I. Maybenko,
O.G. Kremenev, 2026

ГБУ «МАКНИИ», 286132, г. Макеевка, ДНР, Россия
✉ e-mail: expert.maknii05@gmail.com

GBU MAKNIИ, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation
✉ e-mail: expert.maknii05@gmail.com

К вопросу о формировании математической модели процесса инертизации очагов взрывоопасной пылеметановоздушной среды

On the formation of a mathematical model of the process of inertization of explosive dust-methane-air environment

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-5-71-74>

Выемка угля очистным комбайном на газоносных пластах часто сопровождается воспламенением метана, угольной пыли и взрывом пылеметановоздушной смеси. Для устранения данной проблемы применяется система взрывозащитного орошения очистного комбайна, обладающая рядом существенных недостатков. Для их предотвращения представлено описание процесса формирования математической модели инертизации взрывоопасной шахтной среды с помощью подачи необходимого количества газообразного азота в места интенсивного выделения метана и угольной пыли в процессе выемки угля очистным комбайном. Это будет способствовать снижению объемной доли кислорода до 12% и ниже в местах интенсивного выделения метана, образования большого количества угольной пыли и фрикционного искрения и решению проблемы пылевзрывобезопасности при выемке угля очистным комбайном.

Ключевые слова: математическая модель, газообразный азот, инертизация, исполнительный орган, угольный массив, воспламенение метана, технологические параметры, эффективность.

Для цитирования: К вопросу о формировании математической модели процесса инертизации очагов взрывоопасной пылеметановоздушной среды / А.И. Деменков, Н.А. Белоносова, Н.И. Майбенко и др. // Уголь. 2026;(5):71-74. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-71-74.

Abstract

Coal mining with a mining machine on gas-bearing layers is often accompanied by the ignition of methane, coal dust, and the explosion of a dust-methane-air mixture. To address this issue, an explosion-proof irrigation system for the mining machine is used, but it has several significant drawbacks. To prevent these issues, a description of the process of forming a mathematical model for inerting the explosive mine environment by supplying the required amount of nitrogen gas to the areas where methane and coal dust are released during coal mining with a mining machine is provided. This will help reduce the volume fraction of oxygen to 12% or less in areas where methane is released intensively, coal dust is generated, and friction sparks

ДЕМЕНКОВ А.И.

Заведующий лабораторией экспертизы ГБУ «МАКНИИ»,
286132, г. Макеевка, ДНР, Россия,
e-mail: expert.maknii05@gmail.com

БЕЛОНОСОВА Н.А.

Заведующий отделом экспертизы промышленной безопасности ГБУ «МАКНИИ»,
286132, г. Макеевка, ДНР, Россия,
e-mail: expertiza.maknii02@mail.ru

МАЙБЕНКО Н.И.

Младший научный сотрудник ГБУ «МАКНИИ»,
286132, г. Макеевка, ДНР, Россия,
e-mail: expert.maknii05@gmail.com

КРЕМЕНЕВ О.Г.

Старший научный сотрудник ГБУ «МАКНИИ»,
286132, г. Макеевка, ДНР, Россия,
e-mail: maknii.niot@mail.ru

occur, as well as address the issue of dust and explosion hazards during coal mining using a coal mining machine.

Keywords

Mathematical model, nitrogen gas, inertization, executive body, coal massif, methane ignition, technological parameters, efficiency.

For citation

Demenev A.I., Belonosova N.A., Maybenko N.I., Kremenev O.G. On the formation of a mathematical model of the process of inertization of explosive dust-methane-air environment. *Ugol'*. 2026;(5):00-00. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-00-00.

ВВЕДЕНИЕ

Выемка угля очистным комбайном связана с разрушением угольного массива, что часто сопровождается воспламенением выделившегося метана, а иногда и взрывом пылеметановоздушной смеси с тяжелыми последствиями для здоровья и жизни работников. Исследованию данной проблемы посвящены работы ученых как в Российской Федерации, так и за рубежом [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Применение известных мер, таких как взрывозащитное орошение очистного комбайна, не позволяет в полной мере нейтрализовать и предупредить воспламенение метана и взрыв пылеметановоздушной смеси в процессе угледобычи. Исследования показали, что существующая в настоящее время система взрывозащитного орошения очистного комбайна с подачей воды под резец не справляется с возложенными на нее функциями и для повышения ее эффективности требуются дополнительные решения. На отечественных очистных комбайнах система взрывозащитного орошения практически не подавляет фрикционное искрение и не предотвращает воспламенение метана и взрыв пылеметановоздушной смеси из-за низкой надежности. Примерно 20% форсунок взрывозащитного орошения, установленных на шнеках, засоряются в течение рабочей смены, а для фрикционного воспламенения достаточно засорения лишь одной форсунки [7, 8].

Таким образом, для повышения уровня безопасности ведения горных работ при выемке угля очистным комбайном, наряду с существующим взрывозащитным орошением, предлагается дополнительная подача газообразного азота в места непосредственного разрушения угольного массива для осуществления процесса инертизации пылеметановоздушной смеси. В этой связи применение газообразного азота для инертизации пылеметановоздушной среды является актуальной проблемой, решение которой будет способствовать повышению безопасных условий ведения горных работ и позволит повысить производительность очистных комплексов при выемке угля. Важной задачей является разработка методики расчета технологических параметров процесса инертизации [9].

Цель статьи заключается в разработке математической модели процесса инертизации взрывоопасной шахтной среды с помощью подачи необходимого количества газообразного азота, что будет способствовать повышению безопасных условий ведения горных работ и увеличению производительности очистных комплексов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Подачу газообразного азота для проведения процесса инертизации пылеметановоздушной среды планируется производить локально в места непосредственного разрушения угольного массива исполнительным органом очистного комбайна, где происходит интенсивное выделение метана, образование большого количества угольной пыли и присутствует источник фрикционного искрения [10].

Полное и всестороннее исследование сложного технологического процесса, каковым является рассматриваемый газодинамический процесс взаимодействия нескольких субстанций в сложной шахтной атмосфере, требует построения детерминированной математической модели, основанной на системе уравнений математической физики, описывающей происходящее явление согласно законам физики, в частности, газовой динамики и механики сплошной среды.

Вместе с тем, на начальном этапе в большинстве случаев удастся получить достаточно точную методику расчета, основанную на линейных соотношениях, отражающих физику процесса инертизации.

В данном случае характер исследуемого процесса инертизации вполне позволяет применение подобного подхода. Рассматриваемый процесс инертизации предполагает использование свойств газообразного азота подавлять активность происходящих опасных явлений, а именно возгорание выделяющегося метана и взрыв пылеметановоздушной смеси.

Подача необходимого количества газообразного азота в объем полости, образовавшейся после выемки угля, будет способствовать снижению объемной доли кислорода в образовавшейся полости до 12% и ниже, что исключит воспламенение выделившегося метана и взрыв пылеметановоздушной смеси [11].

Разработку математической модели процесса инертизации взрывоопасной шахтной среды при помощи подачи газообразного азота в места разрушения угольного массива с учетом выделяющегося метана предполагается провести в шесть этапов.

1. Первый этап связан с расчетом объема полости, образовавшейся после выемки угля, которая подлежит инертизации при помощи подачи необходимого количества газообразного азота.

Величина объема полости $V_{\text{пол}}(t)$ за единицу времени, образующейся в процессе выемки угля и подлежащей процессу инертизации при помощи подачи газообразного азота, рассчитывается согласно соотношению [12]:

$$V_{\text{пол}}(t) = m \cdot r \cdot v, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где: m – мощность обрабатываемого угольного пласта, м; r – ширина захвата исполнительного органа, м; v – скорость подачи очистного комбайна, м/мин.

2. Второй этап связан с расчетом производительности A очистного комбайна при выемке угля согласно выражению [12]:

$$A = \gamma \cdot m \cdot r \cdot v, \text{ т/мин}, \quad (2)$$

где γ – плотность каменного угля, т/м³.

3. На третьем этапе определяется количество метана $I_{\text{п}}$, выделяющегося из разрушенного угольного массива в процессе выемки угля очистным комбайном согласно выражению [13]:

$$I_{\text{п}} = A \cdot Z \cdot q, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (3)$$

где $Z = 0,07$ – степень дегазации каменного угля; q – метаноносность обрабатываемого угольного пласта, $\text{м}^3/\text{т}$.

4. Четвертый этап связан с расчетом расхода воздуха $Q_{\text{п}}$ для проветривания полости, образующейся в процессе выемки угля отдельно для нижнего и верхнего шнеков [14]:

$$Q_{\text{п}} = S_{\text{п}} \cdot K_{\text{но}} \cdot V_{\text{max}} \cdot 60, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (4)$$

где $S_{\text{п}} = h \cdot r$ – площадь сечения извлекаемого угля, м^2 ; h – высота извлекаемой полоски угля одним шнеком, м ; $K_{\text{но}}$ – коэффициент, учитывающий отработку угольного пласта нижним и верхним шнеками [14]: $K_{\text{но}} = 0,2$ – при работе нижнего шнека; $K_{\text{но}} = 0,35$ – при работе верхнего шнека; $V_{\text{max}} = 4 \text{ м/с}$ – максимальная скорость воздуха, поступающего в очистную выработку, согласно правилам безопасности в угольных шахтах.

С другой стороны, расход воздуха $Q_{\text{п}}$ для проветривания полости, образующейся в процессе выемки угля исполнительным органом очистного комбайна, определяется из соотношения [14]:

$$Q_{\text{п}} = \frac{(100 \cdot I_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}})}{(C - C_0)}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (5)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент неравномерности метановыделения, который определяется согласно [14]:

$$K_{\text{н}} = 1,94 \cdot I_{\text{п}}^{-14}; \quad (6)$$

C – концентрация метана в зоне работы исполнительного органа очистного комбайна, %; C_0 – концентрация метана в поступающей струе воздуха в лаву, %.

5. На пятом этапе из формулы (5) определяется концентрация метана C , % в местах непосредственного разрушения угольного массива для нижнего и верхнего шнеков отдельно [14]:

$$C = \frac{100 \cdot I_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}}}{Q_{\text{оч}}} + C_0. \quad (7)$$

6. Шестой этап связан с расчетом необходимого количества подаваемого газообразного азота для проведения процесса инертизации пылеметановоздушной смеси в объеме полости, образующейся при выемке угля, основанной на использовании выражений процентного содержания (объемной доли) таких газов, как: азот, метан, кислород и других газов, содержащихся в смеси шахтного воздуха и чистого азота, подаваемого от азотно-компрессорной станции [15]. На основании процентного содержания шахтного воздуха разработаны следующие расчетные соотношения:

а) объемная доля азота в образующейся полости определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{N}_2}^3 = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot \varphi_{\text{N}_2} + m_{\text{N}_2}(t) \varphi_{\text{N}_2}^I}{V_{\text{пол}}(t) + m_{\text{N}_2}(t)}, \quad (8)$$

где $\varphi_{\text{N}_2}^3$ – заданная объемная доля азота в образующейся смеси; $m_{\text{N}_2}(t)$ – количество газообразного азота в единицу времени, подаваемого в образовавшуюся полость в процессе выемки угля, $\text{м}^3/\text{мин}$; $\varphi_{\text{N}_2} = 0,78$ – объемная доля азота в атмосферном шахтном воздухе; $\varphi_{\text{N}_2}^I = 0,99$ – объемная доля азота, подаваемого от азотно-компрессорной станции;

б) объемная доля метана в образующейся полости определяется из выражения:

$$\varphi_{\text{CH}_4}^3 = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot \varphi_{\text{CH}_4}^P}{V_{\text{пол}}(t) + m_{\text{N}_2}(t)}, \quad (9)$$

где $\varphi_{\text{CH}_4}^3$ – заданная объемная доля метана в образовавшейся смеси; $\varphi_{\text{CH}_4}^P$ – расчетная объемная доля метана в полости, образующаяся в процессе выемки угля;

в) объемная доля кислорода в образующейся полости определяется из выражения:

$$\varphi_{\text{O}_2}^3 = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot \varphi_{\text{O}_2}^P}{V_{\text{пол}}(t) + m_{\text{N}_2}(t)}, \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{O}_2}^3$ – заданная объемная доля кислорода в образовавшейся смеси; $\varphi_{\text{O}_2}^P$ – расчетная объемная доля кислорода в полости, образовавшейся после выемки угля;

г) объемная доля других газов в образующейся полости определяется из выражения:

$$\varphi_{\Gamma}^3 = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot \varphi_{\Gamma}^P}{V_{\text{пол}}(t) + m_{\text{N}_2}(t)}, \quad (11)$$

где φ_{Γ}^3 – заданная объемная доля других газов в образовавшейся смеси; φ_{Γ}^P – расчетная объемная доля других газов в полости, образующихся в процессе выемки угля.

Если расчетная объемная доля кислорода в образующейся полости в процессе выемки составляет более 12%, то количество газообразного азота в единицу времени $m_{\text{N}_2}(t)$, подаваемого в эту полость от азотно-компрессорной станции, рассчитывается по заданной объемной доле кислорода, и для этой цели представлено выражение, которое определяется из (10):

$$m_{\text{N}_2}(t) = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot (\varphi_{\text{O}_2}^P - \varphi_{\text{O}_2}^3)}{\varphi_{\text{O}_2}^3}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (12)$$

где $\varphi_{\text{O}_2}^P = \varphi_{\text{O}_2} - \varphi_{\text{CH}_4}^P$ – расчетная объемная доля кислорода с учетом выделяющегося метана в вырабатываемой полости; $\varphi_{\text{O}_2} = 0,21$ – объемная доля кислорода в шахтном атмосферном воздухе; $\varphi_{\text{O}_2}^3 = 0,10$ – заданная объемная доля кислорода, подлежащая замещению азотом.

Подача газообразного азота для инертизации полости в процессе выемки угля осуществляется от азотно-компрессорной станции мембранного типа.

Если расчетная объемная доля метана в образующейся полости в процессе выемки угля больше объемной доли кислорода, тогда количество подаваемого газообразного азота в единицу времени $m_{\text{N}_2}(t)$ от азотно-компрессорной станции для инертизации шахтной атмосферы в образующейся полости рассчитывается по заданной объемной доле метана, то для этой цели используется выражение, которое определяется из (9):

$$m_{\text{N}_2}(t) = \frac{V_{\text{пол}}(t) \cdot (\varphi_{\text{CH}_4}^P - \varphi_{\text{CH}_4}^3)}{\varphi_{\text{CH}_4}^3}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (13)$$

где $\varphi_{\text{CH}_4}^p = \frac{C}{100}$ – расчетная объемная доля метана выделяющаяся в образующейся полости в процессе выемки угля; C – концентрация метана в образовавшейся полости в процессе выемки угля, %; $\varphi_{\text{CH}_4}^3$ – заданная объемная доля метана в образующейся полости в процессе выемки угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено описание процесса формирования математической модели инертизации взрывоопасной шахтной среды с помощью подачи необходимого количества газообразного азота в места интенсивного выделения метана и угольной пыли в процессе выемки угля очистным комбайном, что будет способствовать:

- снижению объемной доли кислорода до 12% и ниже в местах интенсивного выделения метана, образования большого количества угольной пыли и источника фрикционного искрения, что предотвратит возгорание выделяющегося метана и взрыв пылеметановоздушной смеси;
- повышению безопасных условий ведения горных работ, связанных с выемкой угля и сохранению здоровья и жизни трудящихся;
- повышению производительности очистного комплекса за счет сокращения простоев, связанных с уменьшением влияния газового фактора.

Список литературы • References

1. Мерзляков В.Г., Деревяшкин И.В. Разработка мероприятий по предотвращению воспламенений метана и угольной пыли при работе выемочных и проходческих машин // Пожаровзрывобезопасность технологических процессов и оборудования. 2015. Т. 24. № 4. С.39-46.
Merzlyakov V.G., Derevyashkin I.V. Development of measures to prevent methane and coal dust ignitions during the operation of mining and tunneling machines. *Fire and Explosion Safety of Technological Processes and Equipment*. 2015;24(4):39-46. (In Russ.).
2. Jia Q., Si R., Wang L. et al. Influence of initial gas concentration on methane-air mixtures explosion characteristics and implications for safety management. *Sci. Rep.* 2023;(13):13519. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40383-3>.
3. Xiaokun Chen, Tenglong Zhao, Fangming Cheng, Kunlun Lu, Xueqiang Shi, Wencong Yu. Investigation of the Suppression of Methane Explosions by N_2/CO_2 Mixtures in Different Proportions. *ACS Omega*. 2023;8(12): 10863-10874. DOI: 10.1021/acsomega.2c07053.
4. Jing Z., Zhou X., Li Y., Bai G., Zhang S. Research on the technology of uniformly injecting nitrogen into the porous long pipes in the gob of the gob-side entry retaining mining mode with roof cutting and pressure relief. *Sci. Rep.* 2024;14(1):18205. DOI: 10.1038/s41598-024-69297-4. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69297-4>.
5. Tsapko Y., Tkachenko T., Kasianova O., Tsapko A., Likhnyovskiy R., Bereznytska Y., Prisyazhnik V., Slutska O., Bedratiuk O. Establishing patterns in eliminating coal fire sites with nitrogen-air mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025;1(10): 28-36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322802>.
6. Haoran G. et al. Underground coal seam gas displacement by injecting nitrogen: Field test and effect prediction. *Fuel*. 2021;(306):121646. <https://www.researchgate.net>.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности в угольных шахтах. Серия 05.

Выпуск 40. М.: Научный центр исследования проблем промышленной безопасности, 2014. 200 с.

8. ГОСТ Р 57071-2016 Нормативы безопасности применения машин и оборудования на угольных шахтах и разрезах по пылевому фактору. М.: Стандартинформ, 2016 22 с.
9. Об инертизации метановоздушной среды угольных шахт / А.И. Деменков, О.Г. Болтунов, Н.И. Майбенко и др. Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сборник научных трудов. Макеевка, МАКНИИ. 2025. № 1(68). С. 14-34.
10. Об инертизации метановоздушной среды в зоне разрушения угольного пласта / А.И. Деменков, О.Г. Болтунов, Н.И. Майбенко и др. Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сборник научных трудов. Макеевка: МАКНИИ, 2025. № 2(69) С.13-19.
11. Портола В.А. Перспектива применения азота для борьбы с пожарами и взрывами в шахте // Экология и охрана труда. 2006. № 3. С.57-59.
Portola V.A. Prospects for the use of nitrogen in the fight against fires and explosions in the mine. *Ecology and Labor Protection*. 2006;(3):57-59. (In Russ.).
12. Ордин А.А., Тимошин А.М., Ботвиненко Д.В. Оптимизация ширины захвата очистного комбайна при подземной разработке пологих метаноопасных угольных пластов // Российская академия наук ФТПРПИ. 2019. № 6. С. 91-102.
Ordin A.A., Timoshin A.M., Botvinenko D.V. Optimization of the cutting width of the cleaning combine in underground development of gentle methane-dangerous coal layers. *Russian Academy of Sciences FTPRPI*. 2019;(6):91-102. (In Russ.).
13. Бобров А.И. Борьба с местными скоплениями метана в угольных шахтах. М.: Недра, 1988. С. 91-102.
14. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Государственный акт по охране труда. Киев: ИПО «Основа», 1994. 312 с.
15. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. Учебное пособие. СПб: СПб ГАХПТ, 1998. 146 с.

Authors Information

Demenkov A.I. – Head of the Laboratory of Expertise, GBU MAKNIИ, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: expert.maknii05@gmail.com

Belonosova N.A. – Head of the Industrial Safety Expertise Department, GBU MAKNIИ, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: expertiza.maknii02@mail.ru

Maybenko N.I. – Junior Researcher, GBU MAKNIИ, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: expert.maknii05@gmail.com

Kremenev O.G. – Senior Researcher, GBU MAKNIИ, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: maknii.niot@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.11.2025

Поступила после рецензирования: 16.04.2026

Принята к публикации: 30.04.2026

Paper info

Received November 24, 2025

Reviewed April 16, 2026

Accepted April 30, 2026