Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.817.3 © В.Ю. Деревянский✉, В.В. Деньга, 2025

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

UDC 622.817.3 © V.Yu. Derevyansky✉, V.V. Denga, 2025

GBU MAKNII, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation
✉ e-mail: maknii.niot@mail.ru

Расчет массогабаритных параметров заслона взрывного типа для локализации взрывов метано- и пылевоздушных смесей в угольных шахтах

Calculation of the weight-and-dimensional characteristics of an explosive-driven barrier for isolation of explosions of firedamp or dust-air mixtures in coal mines

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-11-104-107

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

ДЕНЬГА В.В.
Заведующий лабораторией ГБУ «МАКНИИ», 286132, г. Макеевка, ДНР, Россия, e-mail: makniivrivm@mail.ru

Наиболее распространенными средствами локализации взрывов метано– и пылевоздушных смесей в угольных шахтах Донецкой Народной Республики являются сланцевые и водяные полочные заслоны. Произошедшие аварии выявили их недостаточную эффективность. ГБУ «МАКНИИ» выполняет разработку технического задания на опытный образец заслона взрывного типа, в котором огнетушащее вещество находится внутри гибкого корпуса заслона, и его распыление осуществляется с помощью детонирующего шнура. Разработан порядок расчета массогабаритных параметров этого заслона. Расчет массы огнетушащего вещества в заслоне учитывает объем защищаемого участка горной выработки, минимальную концентрацию огнетушащего вещества, обеспечивающую гашение фронта пламени в одном кубическом метре объема, и коэффициент запаса огнетушащего вещества в заслоне, который зависит от места размещения заслона в выработке.

Ключевые слова: *угольная шахта, горная выработка, взрыв, метано- и пылевоздушная смесь, локализация взрыва, заслон, огнетушащее вещество, инертная пыль.*

Для цитирования: Деревянский В.Ю., Деньга В.В. Расчет массогабаритных параметров заслона взрывного типа для локализации взрывов метано- и пылевоздушных смесей в угольных шахтах // Уголь. 2025;(11):104-107. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-104-107.

Abstract

The most common means for isolation of firedamp and dust air mixtures explosions in coal mines of the Donetsk People's Republic are stone-dust barriers and water shelf barriers. Their poor efficiency was revealed by accidents occurred. The state budgetary institution MAKNII has been developing design assignment for the prototype model of an explosive-driven barrier which contains fire-extinguishing agent inside the flexible casing of the barrier which spraying is carried out by use of the detonating cord. The procedure of calculation of weight-and-dimensional characteristics of this barrier has been

developed. The calculation of the mass of the extinguishing agent reflects the extent of the protected mine working, the minimal concentration of the fire-extinguishing agent which secures the extinguishment of fire front in one cubic meter of the volume as well as reserve coefficient of the fire-extinguishing agent in the barrier, which depends on the location of the barrier in the working.

Keywords

Coal mine, mine working, explosion, firedamp and dust-air mixture, explosion isolation, barrier, fire-extinguishing agent, inert dust.

For citation

Derevyansky V.Yu., Denga V.V. Calculation of the weight-and-dimensional characteristics of an explosive-driven barrier for isolation of explosions of firedamp or dust-air mixtures in coal mines. *Ugol'*. 2025;(11):104-107. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-104-107.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее тяжелыми по своим последствиям авариями в угольных шахтах являются взрывы метано- и пылевоздушных смесей. 17 февраля 2014 г. на шахте «Северная» государственного предприятия «Макеевуголь» в результате взрыва метана было травмировано 19 шахтеров, 7 из них – смертельно. 4 марта 2015 г. произошел взрыв метана на шахте им. А.Ф. Засядько, унесший жизни 34 шахтеров, еще 16 работников получили травмы. 17 ноября 2020 г. на шахте им. А.А. Скочинского «Донецкой угольной энергетической компании» самовозгорание угля привело к взрывам метановоздушной смеси с участием угольной пыли, вследствие чего погибли 4 работника шахты. Всего за период 2014-2022 гг. в угольной промышленности Донецкой Народной Республики было смертельно травмировано 183 шахтера, в том числе от взрывов газа и пыли – 52 человека (28,42%, или почти треть всех погибших в отрасли).

Для снижения тяжести последствий таких аварий, предотвращения последующих взрывов и недопущения перерастания одиночного взрыва в катастрофу на шахтах применяются средства локализации взрывов [1, 2, 3]. Указанные средства препятствуют распространению фронта пламени произошедшего взрыва по горным выработкам, не позволяют воспламенить на пути его распространения взрывоопасные скопления метана и угольной пыли.

В настоящее время ГБУ «МАКНИИ» выполняет разработку технического задания на опытный образец заслона взрывного типа, в котором распыление инертной пыли, воды, ингибиторного порошка или другого огнетушащего вещества (ОВ) должно осуществляться с помощью детонирующего шнура.

Цель статьи – разработать порядок расчета массогабаритных параметров заслона взрывного типа, предназначенного для локализации взрывов метано– и пылевоздушных смесей в угольных шахтах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Наиболее распространенными средствами локализации взрывов в угольных шахтах Донецкой Народной Республики являются сланцевые и водяные полочные заслоны. Действие полочного заслона основано на том, что возникающая при взрыве ударная воздушная волна опрокидывает полки с инертной пылью или с сосудами, заполненными водой, и образующееся при этом облако инертной пыли или воды охлаждает и гасит фронт пламени. Анализ литературных источников [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] и материалов специального расследования произошедших взрывов пыле– и метановоздушных смесей в шахтах (ГБУ «МАКНИИ» обладает уникальной архивной базой таких материалов) выявил основные недостатки указанных заслонов:

– ограниченная область применения, поскольку в конструкции и в принципе действия полочных заслонов заложено противоречие: при «тихих» взрывах давления ударной воздушной волны недостаточно для опрокидывания полок, а при «сильных» взрывах из-за высокой инерционности срабатывания (промежуток времени между приходом ударной волны и распылением находящейся на полках инертной пыли или воды) фронт пламени успевает проскочить заслон до того, как на его пути будет сформировано облако ОВ;

– открытая конструкция предполагает контакт находящейся на полках инертной пыли с шахтной атмосферой, имеющей высокую влажность и запыленность, в результате чего снижаются эффективность и срок годности инертной пыли;

– несрабатывание заслона одновременно по всей его длине;

– влияние на работоспособное состояние заслона «человеческого фактора» (инертную пыль не заменяют, полки прибивают гвоздями, сосуды вместо воды заполняют породой и т.д.);

– при опрокидывании полок инертная пыль неравномерно распределяется по сечению выработки, вследствие чего возможен проскок пламени под кровлей или в нижней части выработки;

– эффективность водяных полочных заслонов зависит от степени диспергирования воды, на которую оказывают значительное влияние параметры ударной воздушной волны (чем больше давление ударной волны, тем меньше размер капель воды, и наоборот).

На основе недостатков применяемых заслонов были сформулированы следующие требования к разрабатываемому заслону:

– закрытая конструкция, исключающая контакт ОВ с шахтной средой;

– гибкий корпус, обеспечивающий возможность размещения заслона в непрямолинейных горных выработках, заведение заслона под став ленточного конвейера и т.д.;

– распыление ОВ с помощью взрывчатого вещества (детонирующего шнура), позволяющее достичь необходимого быстродействия.

Общий вид разрабатываемого заслона взрывного типа показан на *рис. 1*.

Фронт пламени воздействует на средство инициирования – электрическое или неэлектрическое средство приведения в действие детонирующего шнура, которым разрушается корпус заслона и осуществляется распыление находящегося в нем ОВ. Ранее проведенные исследования [3, 4, 5, 6, 7] показали, что факторами взрыва, на

которые рассчитано срабатывание средств локализации взрывов газо– и пылегазовых смесей в угольных шахтах, являются ударная волна, температура и излучение пламени. Для надежной локализации взрыва заслон должен срабатывать от всех этих факторов и использовать как электрический, так и неэлектрический способы приведения в действие детонирующего шнура. Электрический способ инициирования реализуется подключением заслона к шахтной многофункциональной системе безопасности (МФСБ) и использованием для обнаружения взрыва датчиков давления, температуры, а также оптического датчика.

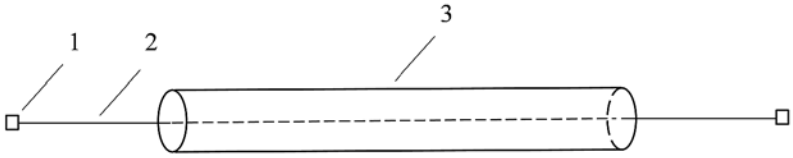

Рис. 1. Общий вид заслона взрывного типа: 1 – электрическое или неэлектрическое средство приведения в действие детонирующего шнура; 2 – детонирующий шнур; 3 – гибкий корпус

Fig.1. Assembled representation of an explosive-driven barrier: 1 – electrical or non-electrical activating means of a detonating cord; 2 – detonating cord; 3 – flexible casing

Концы детонирующего шнура растягиваются по выработке и обеспечивают срабатывание заслона еще до подхода к нему фронта пламени с одной или с другой стороны. Последовательное соединение двух и более отрезков детонирующего шнура позволяет составлять общую магистраль разной длины, величина которой определяется с учетом возможной максимальной скорости распространения фронта пламени по выработке.

Конструкция заслона позволяет реализовать локализацию взрыва способом секционирования. Для этого два и более заслона последовательно соединяются с помощью детонирующего шнура, обеспечивающего их практически одновременное срабатывание. Таким образом, защищаемая заслоном длина горной выработки (выработок) может варьироваться в широких пределах – от десятков метров и более.

Высокая скорость детонации современных детонирующих шнуров (5000 м/с и более [8, 9, 10]) в сочетании со значительной длиной создаваемой заслоном «пробки» из ОВ позволит локализовать сильные взрывы.

Расчет массы заполняющего заслон ОВ ведется для объема того участка горной выработки, в котором с помощью заслона должна быть создана непреодолимая для фронта пламени «пробка». Необходимое значение дает произведение объема этой «пробки» на минимальную концентрацию ОВ в одном кубическом метре объема, обеспечивающую гашение фронта пламени:

$$m = S_{св} \cdot \ell \cdot C \cdot k_{зап}, \quad (1)$$

где m – масса ОВ в заслоне, кг; $S_{св}$ – площадь поперечного сечения горной выработки в свету в месте установки заслона, м^2; ℓ – длина заслона, м; C – минимальная концентрация ОВ, при которой достигается гашение фронта пламени, кг/м^3; $k_{зап}$ – коэффициент запаса массы ОВ в заслоне, учитывает условия распыления ОВ в зависимости от места размещения заслона в горной выработке. На *рис. 2* приведены возможные варианты размещения разрабатываемого заслона взрывного типа в горной выработке, закрепленной металлической арочной крепью.

Детонирующий шнур расположен в центре сечения корпуса заслона, и распыление ОВ происходит равномерно во все стороны. Из *рис. 2* следует, что наилучшие условия для распыления ОВ имеет вариант I (направления распыления показаны стрелками). Однако его практическая реализация невозможна, так как заслон будет загораживать рабочее пространство горной выработки и создавать препятствие для производства работ и передвижения людей по выработке. Срабатывание заслона в центре сечения выработки, при котором обеспечивается равномерное распыление ОВ во все стороны, возможно при наличии специального устройства, сбрасывающего его с крепления под кровлей и приводящего заслон в действие во время падения. Для варианта I значение $k_{зап} = 1$.

Наиболее приемлемыми с практической точки зрения размещения заслона взрывного типа в горной выработке являются варианты II и III. В варианте II заслон размещается под кровлей. Этот вариант имеет наилучшие условия для распыления ОВ. В варианте III заслон подвешивается к стенке выработки к рамам крепи, аналогично тому, как подвешиваются электрические кабели. В момент срабатывания (*см. рис. 2*) только половина ОВ будет распылена в рабочее пространство горной выработки (показано стрелками). Поэтому для вариантов II и III значение коэффициента запаса массы ОВ в заслоне следует принимать равным $k_{зап} = 2$. Вариант IV размещения заслона в горной выработке не рекомендуется ввиду его неэффективности, так как имеет наихудшие условия для распыления в направлении снизу-вверх, и при срабатывании только примерно четверть массы ОВ будет распылена в рабочее пространство горной выработки.

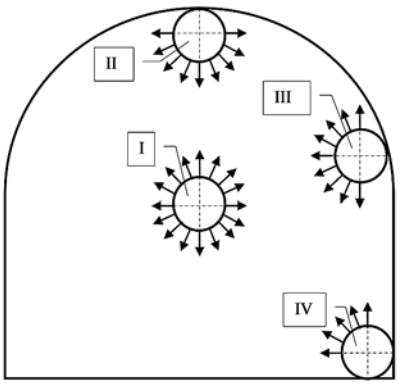

Рис. 2. Варианты размещения заслона взрывного типа в горной выработке

Fig. 2. Layout options of an explosive-driven barrier in a mine working

В качестве примера приведем расчет массы ОВ в заслоне взрывного типа для следующих условий: площадь поперечного сечения горной выработки в свету в месте установки заслона – 10 м^2; вариант размещения заслона в выработке – III, $k_{зап} = 2$; длина заслона – 50 м (в соответствии со стандартной длиной детонирующего шнура); в качестве ОВ применяется инертная пыль, C = 0,788 кг/м^3 [11], округлим в большую сторону и примем C = 1,0 кг/м^3. Из уравнения (1) получаем:

$m = 10 \cdot 50 \cdot 1{,}0 \cdot 2 = 1000$ кг.

Для определения всех массогабаритных параметров заслона найдем зависимости между массой ОВ, внутренним диаметром и длиной заслона. Форма корпуса заслона соответствует форме цилиндра, поэтому масса ОВ, содержащегося в заслоне, связана с другими параметрами уравнением, выражающим произведение объема цилиндра [12] на плотность ОВ:

$$m = \frac{\pi \cdot \ell \cdot d^2 \cdot \rho}{4}, \quad (2)$$

где π – математическая константа, $\pi = 3{,}14$; d – внутренний диаметр заслона, м; ρ – плотность ОВ, кг/м^3.

Из уравнения (2) получаем выражение для определения внутреннего диаметра заслона:

$$d = \sqrt{\frac{4m}{\pi \cdot \ell \cdot \rho}}, \quad (3)$$

При известных значениях массы ОВ и внутреннего диаметра может быть вычислена длина заслона:

$$\ell = \frac{4m}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}.$$

Используя уравнение (3), определим внутренний диаметр заслона для приведенного выше примера. Необходимое значение плотности инертной пыли примем по данным, имеющимся в МАКНИИ ($\rho = 1156$ кг/м^3), отметив при этом, что у разных производителей инертной пыли это значение будет отличаться. Внутренний диаметр заслона равен: $d \approx 0{,}15$ м.

С учетом наружного диаметра, размещаемого внутри корпуса заслона детонирующего шнура (6 мм [8]), внутренний диаметр заслона примем $d = 0{,}16$ м.

Практически в каждой аварии с человеческими жертвами, обусловленной взрывом газо– или пылегазовой смеси в угольной шахте, имеются пострадавшие с механическими травмами, вызванными воздействием ударной воздушной волны. Это указывает на перспективное направление дальнейших исследований – создание и оснащение средств локализации взрывов веществами, обеспечивающими не только гашение фронта пламени, но и ударной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГБУ «МАКНИИ» осуществляет разработку технического задания на опытный образец заслона взрывного типа, предназначенного для локализации взрывов метано– и пылевоздушных смесей в подземных выработках угольных шахт. Распыление инертной пыли, воды, ингибиторного порошка или другого ОВ в разрабатываемом заслоне осуществляется с помощью детонирующего шнура. Приведен и проиллюстрирован примером порядок расчета массогабаритных параметров этого заслона.

Список литературы • References

1. Деревянский В.Ю., Деньга В.В. Анализ использования полочных заслонов для локализации взрывов метанопылевоздушных смесей в угольных шахтах. Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сборник научных трудов МАКНИИ. 2025. Вып. 1 (68). С. 46-52.
2. Деревянский В.Ю., Деньга В.В., Белодед А.Г. Анализ недостатков полочных водяных и сланцевых заслонов для локализации взрывов метано– и пылевоздушной смесей в угольных шахтах / Материалы круглого стола «Актуальность вопросов создания безопасных и здоровых условий труда на производствах», 26 ноября 2024 г., МАКНИИ, Макеевка, 2024. С. 18-21.
3. Кудинов Ю.В. Безопасность работ и охрана труда в угольных шахтах / под ред. д-ра техн. наук Ю.В. Кудинова и канд. техн. наук Т.Я. Мхатвари. Донецк: ФЛП Муравецкий О.Н., 2021. 256 с.
4. Ноженко А.А. Совершенствование средств предупреждения взрывов угольной пыли в шахтах и их локализации. Сб. науч. тр. ДонГТИ. 2022. № 27(70). С. 18-23.
5. Experimental study on the isolation effect of an active flameproof device on a gas explosion in an underground coal mine. [Electronic resource]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/376503379_Experimental_Study_on_the_Isolation_Effect_of_an_Active_Flame-Proof_Device_on_a_Gas_Explosion_in_an_Underground_Coal_Mine (accessed 15.09.2025).
6. Suppression characteristics of methane/coal dust explosions by active explosion suppression system in the large mining tunnel. [Electronic resource]. Available at: https://colab.ws/articles/10.1016%2Fj.firesaf.2024.104251?ysclid= mempl6up3j15916874 (accessed 15.09.2025).
7. Technology to prevent methane or coal dust explosions in the mine. [Electronic resource]. Available at: https://peerianjournal.com/index.php/tpj/ article/view/307/262 (accessed 15.09.2025).
8. ДШ-А, ДШ-Б, ДШ-В, ДШЭ-8, ДШЭ-12 (продажа, характеристики, описание ВМ). [Электронный ресурс]. URL: https://expertvr.ru/explosives/dsh-a_dsh-b_dsh-v_dshe-8_dshe-12/?ysclid=memrf633y4947992170 (дата обращения: 15.09.2025).
9. Our detonating cords with PETN are robust and reliable. [Electronic resource]. Available at: https://www.dynonobel.com/products-services/products/initiation-systems/det-cord (accessed 15.09.2025).
10. Detonating cord. [Electronic resource]. Available at: https://www.nitrochem.gr/assets/site/content/productfiles/init/DetonatingCords.pdf (accessed 15.09.2025).
11. Шевцов Н.Р. Экспериментальные данные по предотвращению воспламенений метановоздушной смеси взрывом заряда ВВ. Сб. науч. тр. ДонГТУ. Серия горно-геологическая. 2001. Вып. 23. С. 32-36.
12. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1986. 320 с.

Authors Information

Derevyansky V.Yu. – Senior Research, GBU MAKNII, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: maknii.niot@mail.ru

Denga V.V. – Head of the Laboratory, GBU MAKNII, Makeyevka, 286132, DPR, Russian Federation, e-mail: makniivrivm@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.10.2025
Поступила после рецензирования: 18.10.2025
Принята к публикации: 30.10.2025

Paper info

Received October 1, 2025
Reviewed October 18, 2025
Accepted October 30, 2025