

# Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-73-78>

Угольная пыль в угледобывающих шахтах присутствует всегда и является источником повышенной пожарной опасности. Не решен вопрос о влиянии сгорания угольной пыли на взрывобезопасные расстояния при опасности аварийного взрыва метана. В статье представлены результаты расчетно-теоретического анализа влияния распространения пламени по газозвеси угольной пыли, поднятой со стенок выработок при прохождении ударной волны от аварийного взрыва метана в подготовительной выработке. Проанализированы варианты, когда установленные в подготовительной выработке водяные заслоны сработали или не сработали. Установлено, что при распространении фронта горения по газозвеси угольной пыли после взрыва метана позади ударной волны поддерживается повышенное давление. Поэтому ударная волна имеет интенсивность чуть большую, чем в случае, когда угольная пыль не горит. Водяные заслоны обеспечивают существенное снижение интенсивности ударной волны. Предложенный подход может быть полезен для практического применения при анализе влияния горения угольной пыли на интенсивность ударной волны в угольных шахтах при аварийных взрывах метана.

**Ключевые слова:** аварийный взрыв метана, ударная волна, горение газозвеси угольной пыли, водяные заслоны, численное моделирование.

**Для цитирования:** Влияние горения угольной пыли на интенсивность ударной волны от аварийного взрыва метана в шахте / А.Ю. Крайнов, О.Ю. Лукашов, К.М. Моисеева, и др. // Уголь. 2022. № 9. С. 73-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-73-78.

## ВВЕДЕНИЕ

При прохождении подготовительных выработок для организации плановых работ разработки угольных пластов существует повышенная опасность скопления метана в тупиковой подготовительной выработке. На стенках подготовительной выработки в процессе работ накапливается угольная пыль. При аварийном взрыве метана в области вблизи тупика подготовительной выработки в ней распространяется ударная волна (УВ). Она поднимает со стенок отложения угольной пыли, которая, попадая в высокотемпературные зоны взрыва, воспламеняется, горит и вносит определенный вклад в интенсивность распространяющейся по выработкам взрывной волны. Поэтому для оценки безопасных расстояний необходимо учитывать горение угольной пыли.

## КРАЙНОВ А.Ю.

Заведующий кафедрой математической физики ТГУ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, Россия, e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

## ЛУКАШОВ О.Ю.

Директор ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-системы», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: olukashov@gmail.com

## МОИСЕЕВА К.М.

Доцент кафедры математической физики ТГУ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, Россия, e-mail: moiseeva\_km@t-sk.ru

## КОЛЕГОВ Г.А.

Аспирант кафедры математической физики ТГУ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 634050, г. Томск, Россия, e-mail: zergferr@gmail.com

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-10034.

Экспериментальные результаты исследования волн горения, взрывных и детонационных волн в системах метан – воздух – угольная пыль, метан – кислород – угольная пыль содержатся в работах [1, 2]. В [3] экспериментально исследовано распространение пламени в газозвесах угольной пыли различной дисперсности при взрыве в трубе с поворотом. Была установлена возможность возникновения повторного взрыва в трубе и показано [3], что взрыв газа может вызвать взрыв поднятой пыли. В [4] экспериментально исследованы характеристики распространения пламени в угле – метано – воздушной смеси в условиях разветвленной сети труб. Исследовалось влияние дисперсности угольной пыли на величину избыточного давления и на скорость распространения пламени в трубопроводе. В работе [5] проведено исследование взрывоопасности угольной пыли. Проанализирована скорость роста давления в сферическом объеме в зависимости от дисперсности угольной пыли.

В подготовительных выработках в обязательном порядке расставляются водяные или сланцевые заслоны [6]. При взаимодействии УВ с заслонами она частично отражается, что приводит к уменьшению интенсивности прошедшей за заслон УВ. За счет частичного смачивания стен выработки при разрыве полиэтиленовых мешков водяного заслона или частичного оседания сланцевой пыли на стенки угольная пыль на стенах смачивается или разбавляется инертной пылью, что понижает ее способность к воспламенению во фронте пламени.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния горения угольной пыли на интенсивность УВ при аварийном взрыве метана в тупике подготовительной выработки ставится задача математического моделирования распространения УВ с учетом горения угольной пыли в подготовительной выработке и примыкающей к действующей сквозной выработке. Схема выработок представлена на рис. 1.

Пусть в прямолинейной тупиковой выработке произошел взрыв скопления метана. На стенках выработки имеются отложения угольной пыли с известной поверхностной плотностью. В подготовительной выработке установлены водяные заслоны. После взрыва впереди расширяющейся зоны, занятой раскаленными продуктами взрыва, распространяется воздушная УВ, которая поднимает пыль со сте-

нок выработки и вовлекает ее в движение. За УВ возникает зона запыления газа. Частицы, находящиеся вблизи зоны продуктов взрыва, нагреваются за счет кондуктивного и турбулентного теплопереноса и излучения из высокотемпературной зоны продуктов взрыва. В прогретой области зоны запыления всегда имеется достаточное количество кислорода, в котором нагретые частицы воспламеняются. Горение пыли приводит к локальному повышению давления газа, что сказывается на интенсивности взрывной волны и характере ее затухания. Предполагается, что в зоне расположения заслонов после их срабатывания от воздействия УВ угольная пыль смачивается водой или инертизуется сланцевой пылью и не горит.

Математическая модель движения и горения газопылевой среды в выработке была построена на основе уравнений газовой динамики и механики дисперсных сред в односкоростном и однотемпературном приближении и подробно представлена в [7, 8, 9]. Система уравнений математической модели [7, 8] описывает движение пылегазовой смеси вдоль выработок с учетом того, что в запыленной среде распространяется волна горения по газозвеси. В области, где расположены водяные заслоны, эти уравнения описывают движение аэрозоля воды (взвеси сланцевой пыли) вдоль выработок с учетом ее частичного осаждения на стенки. В модели [7, 8] скорость распространения волны горения по газозвеси и скорость горения частицы угольной пыли являются параметрами модели. В [10] показано, что линейная скорость горения частиц угольной пыли в диффузионном режиме – квазистационарная величина. Как показывают исследования горения газозвесей [11], скорость распространения ламинарного пламени в покоящейся газозвеси угольных частиц имеет величину в интервале 0,5-2,0 м/с. Наличие турбулентности в газовом потоке увеличивает скорость распространения пламени в газозвеси до десятков метров в секунду.

Система уравнений решается с использованием модифицированной программы ЭВМ [12]. Расчеты проводились при следующих исходных данных: начальное давление и температура в выработках  $p_0 = 0,10132$  МПа,  $T_0 = 300$  К, давление и температура в зоне взрыва метановоздушной смеси  $p_b = 0,304$  МПа,  $T_b = 930$  К, теплота сгорания одного килограмма угольной пыли (с учетом инертных примесей)

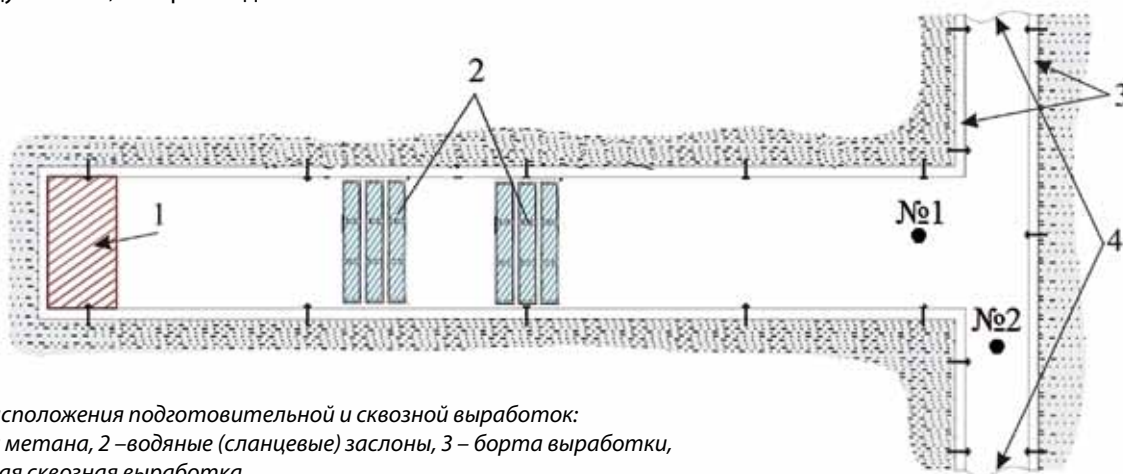


Рис. 1. Схема расположения подготовительной и сквозной выработок:  
1 – зона взрыва метана, 2 – водяные (сланцевые) заслоны, 3 – борта выработки,  
4 – действующая сквозная выработка

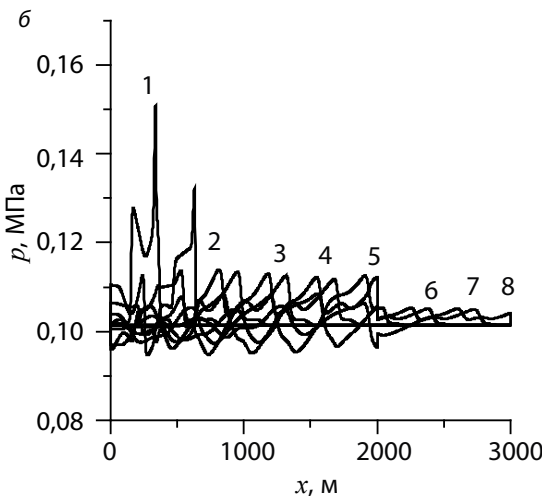
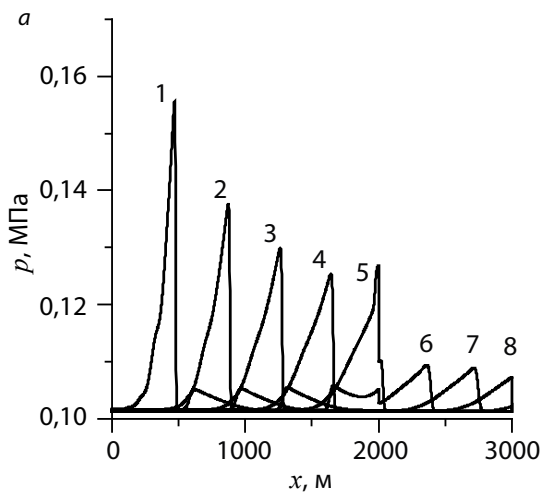


Рис. 2. Распределение давления по длине подготовительной и ветвях сквозной выработок в фиксированные моменты времени с интервалом 1 с: а – вариант 1, б – вариант 2

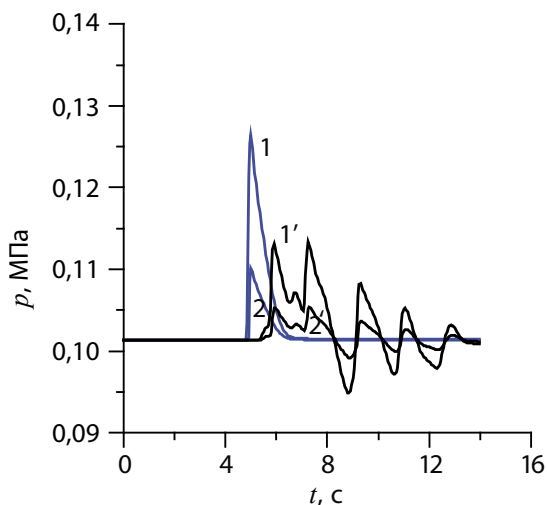


Рис. 3. Изменение давления во времени в контрольных точках: 1, 1' – контрольная точка № 1; 2, 2' – контрольная точка № 2. Синие линии – водяные заслоны отсутствуют, черные линии – водяные заслоны установлены и полностью сработали

$Q_{\psi} = 10$  МДж/кг, площадь сечения выработок  $S = 10$  м<sup>2</sup>, периметр поперечного сечения выработок  $\Pi = 12$  м, средний размер частиц угольной пыли  $r_{p,0} = 20 \cdot 10^{-6}$  м, начальная распределенная плотность угольной пыли в газовзвеси  $\rho_{3,u} = 0,1$  кг/м<sup>3</sup>, скорость распространения волны горения относительно газовзвеси  $U_f = 10$  м/с, линейная скорость горения частицы угля  $a_1 = 2,5 \cdot 10^{-5}$  м/с, начальная распределенная плотность воды (пыли) после срабатывания заслона  $\rho_{3,w} = 15$  кг/м<sup>3</sup>, область загазования метаном от тупика  $x_0 = 0$  м до координаты  $x_1 = 30$  м, область установки водяного (сланцевого) заслона: первый заслон от  $x_2 = 300$  м до  $x_3 = 340$  м, второй заслон от  $x_4 = 600$  м до  $x_5 = 640$  м, длина подготовительной выработки  $L_1 = 2000$  м, длина правой и левой ветвей сквозной выработки  $L_2 = L_3 = 2000$  м. Теплофизические характеристики воздуха и угля справочные.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная в [7, 8] математическая модель позволяет изучить взаимодействие УВ с водяными и сланцевыми заслонами, влияние горения угольной пыли на интенсивность УВ от аварийного взрыва метана. Были выбраны следующие варианты расчетов развития взрыва в подготовительной выработке и распространения УВ в подготовительной и сквозной выработках:

1. Взрыв метана в тупике подготовительной выработки с длиной загазования 30 м.

2. Взрыв метана в тупике подготовительной выработки с длиной загазования 30 м и взаимодействие УВ с двумя водяными заслонами, начала которых расположены на расстоянии 300 м и 600 м от тупика выработки, длиной 40 м каждый. Заслоны обеспечивают распределенную плотность воды  $\rho_{3,w} = 15$  кг/м<sup>3</sup>. В процессе движения аэрозоля воды вдоль выработки капли аэрозоля оседают на стенки выработки.

3. Взрыв метана в тупике подготовительной выработки с длиной загазования 30 м и распространение фронта горения по газовзвеси угольной пыли от координаты 30 м до координаты 300 м.

4. В этом варианте приняты параметры, как в варианте 2, и дополнительно учитывается распространение фронта горения по газовзвеси угольной пыли от координаты 30 м до координаты 300 м.

В процессе расчетов контролировалось изменение давления в двух контрольных точках, расположенных в подготовительной выработке на расстоянии 10 м от сопряжения (контрольная точка № 1) и в сквозной выработке на расстоянии 10 м от сопряжения (контрольная точка № 2, см. рис. 1). Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3, 4, 5, 6.

Из сравнения вариантов расчетов 1 и 2 (см. рис. 2) следует, что при взаимодействии с двумя водяным заслонами УВ частично отражается от более плотной газокапельной среды, частично проходит. Прошедшая за заслон УВ имеет меньшую интенсивность. Отраженная волна достигает тупика выработки, отражается и идет вслед первой волне. Прошедшая УВ частично отражается от второго заслона, движется в обратном направлении и взаимодействует с остатками облака аэрозоли воды первого заслона. Развивается сложная газодинамическая картина. В контрольных точках № 1 и № 2 фиксируется несколько пиков давления (см. рис. 3). В контрольной точке № 2 при установке водяных заслонов избыточное давление меньше предельно допустимого для персонала шахты (установленная допустимая величина избыточного давления в УВ не выше 6 кПа [6]).

Из сравнения вариантов расчетов 1 и 3 (см. рис. 2, а и рис. 4) следует, что при распространении фронта горения по газовзвеси уголь-

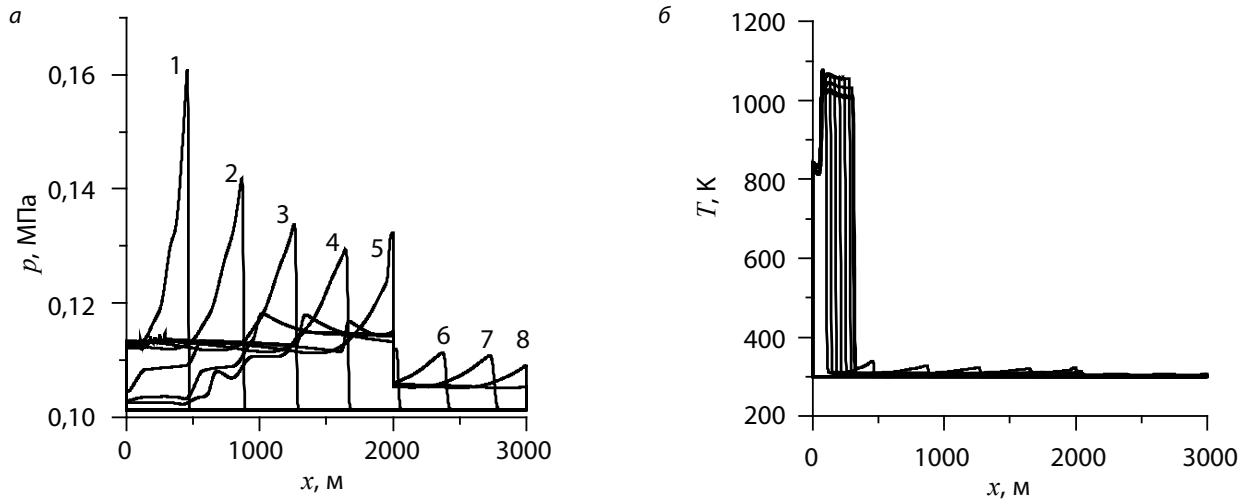


Рис. 4. Распределение давления (а) и температуры (б) по длине подготовительной и ветви сквозной выработок в фиксированные моменты времени с интервалом 1 с. Вариант 3

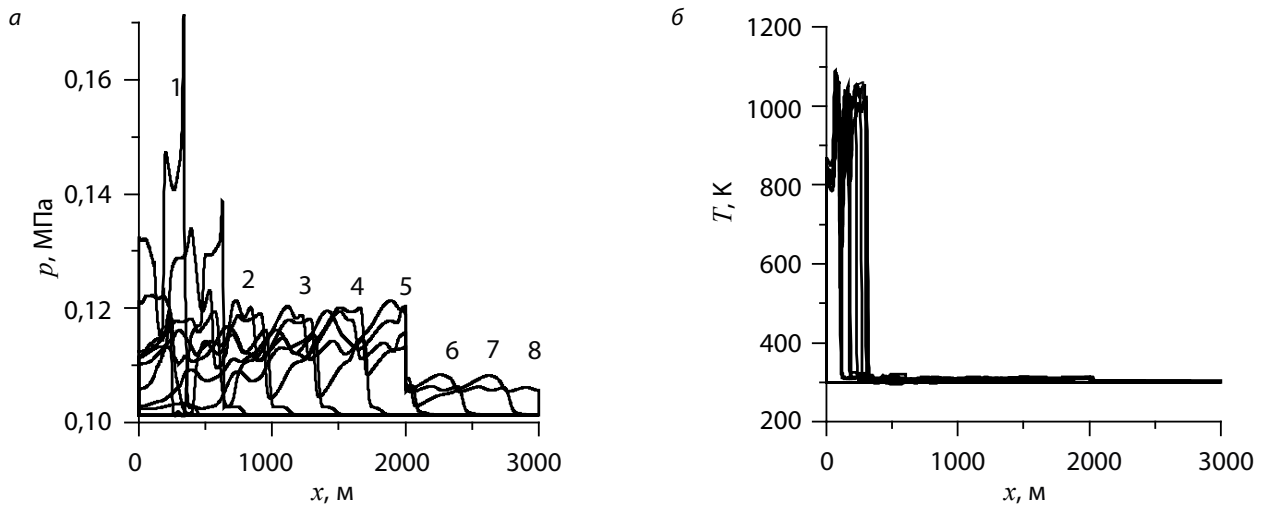


Рис. 5. Распределение давления (а) и температуры (б) по длине подготовительной и ветви сквозной выработок в фиксированные моменты времени с интервалом 1 с. Вариант 4

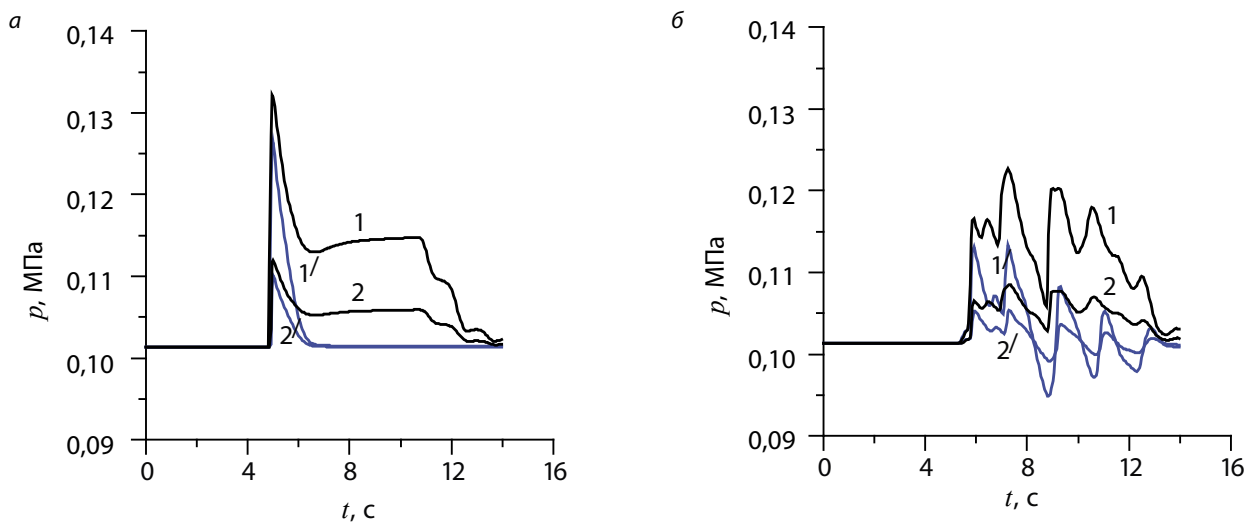


Рис. 6. Изменение давления во времени в контрольных точках: 1, 1' – контрольная точка № 1; 2, 2' – контрольная точка № 2. Синие линии – угольной пыли нет, черные линии – угольная пыль горит; а – водяные заслоны отсутствуют (или не сработали); б – водяные заслоны установлены и полностью сработали

ной пыли после взрыва метана УВ, распространяющаяся по выработкам, имеет большую интенсивность. В рассмотренных вариантах избыточное давление во фронте УВ на 20% выше, чем в случае, когда угольная пыль не горит. За УВ формируется зона повышенного давления (см. рис. 4, а), которой нет, когда взвесь угольной пыли не горит (см. рис. 2). В участке, где сгорела газовзвесь угольной пыли, образовалась область высокой температуры (см. рис. 4, б). В контрольных точках № 1 и № 2 избыточное давление превышает предельно допустимое для персонала шахты. В контрольных точках № 1 и № 2 при горении взвеси угольной пыли фиксируется повышенное давление, по сравнению с вариантом, когда угольная пыль не горит, повышенное давление в контрольных точках существует дольше во времени (см. рис. 6, а).

Из сравнения вариантов расчетов 3 и 4 (см. рис. 4 и рис. 5) видно, что динамика взаимодействия УВ с двумя водяными заслонами аналогична варианту 2. При этом средний уровень давления за УВ в вариантах 3 и 4 выше из-за горения угольной пыли. В контрольных точках № 1 и № 2 фиксируется несколько пиков давления (см. рис. 6, б). В контрольной точке № 2 при установке водяных заслонов избыточное давление меньше предельно допустимого для персонала шахты.

Из сравнения результатов расчетов выбранных вариантов можно отметить следующее. При срабатывании водяных заслонов интенсивность УВ уменьшается. Горение газовзвеси угольной пыли за УВ от аварийного взрыва метана повышает величину и время воздействия избыточного давления в выработках шахты.

Из сравнения вариантов 1 и 2 (когда после взрыва метана в выработках есть или нет водяных заслонов) видно, что в случае отсутствия водяных заслонов в сквозной выработке интенсивность воздушной УВ превышает безопасную для персонала шахты величину. При срабатывании водяных заслонов интенсивность УВ в сквозной выработке не превышает опасного уровня (см. рис. 2, а, б и рис. 3, кривая 2').

В расчетах было принято, что при взрыве заданного количества метана выделилось 160 МДж тепла. В вариантах 3 и 4, в которых происходит распространение пламени по газовзвеси угольной пыли, после ее сгорания выделяется 825 МДж тепла. Выделившейся теплоты от сгорания угольной пыли в пять раз больше, чем от взрыва метана. Однако при взрыве метана в зоне взрыва повышается давление, и начинает распространяться УВ со скоростью звука. Скорость распространения пламени по газовзвеси угольной пыли во много раз меньше скорости звука. В связи с этим УВ от взрыва метана успевает распространиться на большое расстояние, и лишь небольшие возмущения давления от сгорания угольной пыли движутся вслед за первой УВ, догоняют ее и поддерживают ее интенсивность. Интенсивность УВ в случае горения газовзвеси угольной пыли позади УВ всегда немного выше. Как показывают расчеты вариантов 1 и 3, это превышение небольшое.

Представленная в [7, 8] модель имеет в качестве параметров согласования с экспериментом две величины – скорость распространения волны горения и скорость горения частицы пыли. Как показывают расчеты, а также

данные [7, 8], линейная скорость горения частицы угольной пыли слабо влияет на скорость распространения пламени относительно стенок выработок. Основным параметром, влияющим на скорость распространения пламени, является скорость распространения волны горения относительно газовзвеси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный расчетно-теоретический анализ влияния распространения пламени по газовзвеси угольной пыли, поднятой со стенок выработок при прохождении ударной волны от аварийного взрыва метана в подготовительной выработке, показал, что горение взвеси угольной пыли после аварийного взрыва метана влияет на интенсивность УВ. Установлено, что при распространении фронта горения по газовзвеси угольной пыли после взрыва метана за ударной волной поддерживается повышенное давление. Ударная волна, распространяющаяся по выработкам, имеет интенсивность чуть большую, чем в случае, когда угольная пыль не горит. Водяные заслоны обеспечивают существенное снижение интенсивности ударной волны.

Представленная для расчетно-теоретического анализа модель, в которой используется величина скорости распространения пламени относительно неподвижной газовзвеси угольной пыли, определенная из экспериментальных данных, может быть полезна для практического применения при анализе влияния горения угольной пыли на интенсивность УВ в угольных шахтах при аварийных взрывах метана.

## Список литературы

1. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 4. С. 5-16.
2. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Волны горения и детонации в смесях газов  $\text{CH}_4/\text{Air}$ ,  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  с взвесями каменного угля // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 5. № 6. С. 56-68.
3. Influences of a Pipeline's Bending Angle on the Propagation Law of Coal Dust Explosion Induced by Gas Explosion / Zhang Leilin, Yang Qianyi, Shi Biming et al. // Combustion Science and Technology. 2021. Vol. 193. No. 5. P. 798-811.
4. Methane-Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks / Niu Yihui, Zhang Leilin, Shi Biming et al. // Combustion Science and Technology. 2021. Vol. 193. No. 10. P. 1734-1746.
5. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility / Shang-Hao Liu, Yang-Fan Cheng, Xiang-Rui Meng et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 56. P. 444-450.
6. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. М., 1997. 201 с.
7. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов и др. Томск: Издательство Томского университета, 2006. 322 с.
8. Моделирование распространения ударных волн от взрыва и горения газопылевой смеси в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, И.М. Васенин и др. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 371-377.

9. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, В.Н. Костеренко и др. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр». 2011. 312 с.
10. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
11. Krishenik P.M., Rumanov E.N., Shkadinskii K.G. Modeling of combustion wave propagation in a carbon dust/gas mixture // *Combustion and flame*. 1994. № 99. P. 713-722.
12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616516. «Ударная волна» / Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю., Крайнов А.Ю. Правообладатель ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы» (RU). Заявка № 2015613051 от 17.04.2015; опубл. 11.06.2015.

## Original Paper

UDC 532.593 © A.Yu. Kraynov, O.Yu. Lukashov, K.M. Moiseeva, G.A. Kolegov, 2022  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 9, pp. 73-78  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-73-78>

### Title

#### EFFECT OF COAL DUST COMBUSTION ON SHOCKWAVE INTENSITY OF A METHANE EXPLOSION IN AN UNDERGROUND MINE

## Author

Kraynov A.Yu.<sup>1</sup>, Lukashov O.Yu.<sup>2</sup>, Moiseeva K.M.<sup>1</sup>, Kolegov G.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup> Shakhtekspert-Sistemy LLC, Kemerovo, 650065, Russian Federation

## Authors Information

**Kraynov A.Yu.**, Head of the Department of Mathematical Physics, e-mail: [akrainov@ftf.tsu.ru](mailto:akrainov@ftf.tsu.ru)

**Lukashov O.Yu.**, Director, e-mail: [olukashov@gmail.com](mailto:olukashov@gmail.com)

**Moiseeva K.M.**, Associate Professor of the Department of Mathematical Physics, e-mail: [moiseeva\\_km@t-sk.ru](mailto:moiseeva_km@t-sk.ru)

**Kolegov G.A.**, Graduate Student of the Department of Mathematical Physics, e-mail: [zergferr@gmail.com](mailto:zergferr@gmail.com)

## Abstract

Coal dust is always present in coal mines and is a source of increased fire danger. The issue of the effect of coal dust combustion on explosion-proof distances at the risk of an emergency methane explosion has not been resolved. The article presents the results of a computational and theoretical analysis of the effect of flame propagation through the gas suspension of coal dust raised from the walls of the workings during the passage of a shock wave from an emergency explosion of methane in the preparatory development. The variants when the water barriers installed in the preparatory workings worked or did not work are analyzed. It is established that when the combustion front propagates through the coal dust gas suspension after the methane explosion, an increased pressure is maintained behind the shock wave. The shock wave has intensity slightly greater than in the case when coal dust does not burn. Water barriers provide a significant reduction in the intensity of the shock wave. The proposed approach can be useful for practical application in analyzing the effect of coal dust combustion on the intensity of the shock wave in coal mines during emergency methane explosions.

## Keywords

Emergency explosion of methane, Shock wave, Combustion of coal dust gas suspension, Water barriers, Numerical modeling.

## References

1. Pinaev A.V. & Pinaev P.A. Studies of comparative chemical activity of methane and airborne coal particles during combustion, explosion and detonation. *Vestnik Nauchnogo centra VostNil po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti*, 2019, (4), pp. 5-16. (In Russ.).
2. Pinaev A.V. & Pinaev P.A. Combustion and detonation waves in H<sub>2</sub>/Air, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> gas mixtures with air-born hard coal particles. *Fizika goreniya i vzryva*, 2020, Vol. 56, (6), pp. 56-68. (In Russ.).
3. Leilin Zhang, Qianyi Yang, Biming Shi, Yihui Niu & Zheng Zhong. Influences of a Pipeline's Bending Angle on the Propagation Law of Coal Dust Explosion Induced by Gas Explosion. *Combustion Science and Technology*, 2021, Vol. 193, (5), pp. 798-811.

4. Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong. Methane-Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks. *Combustion Science and Technology*, 2021, Vol. 193, (10), pp. 1734-1746.

5. Shang-Hao Liu, Yang-Fan Cheng, Xiang-Rui Meng, Hong-Hao Ma, Shi-Xiang Song, Wen-Jin Liu & Zhao-Wu Shen. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, (56), pp. 444-450.

6. Charter of the paramilitary mine rescue unit for organization and execution of mine rescue work in operations of the coal and oil shale industries. Moscow, 1997, 201 p. (In Russ.).

7. Vasenin I.M., Schragr E.R., Kraynov A.Yu., Lukashov O.Yu. et al. Mathematical modelling of combustion and explosion of high-energy systems. Tomsk, Tomsk University Publ., 2006, 322 p. (In Russ.).

8. Paleyev D.Yu., Lukashov O.Yu., Vasenin I.M. et al. Modeling of shock wave propagation from explosion and combustion of a gas-dust mixture in coal mines. *Naukoemkie tehnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov*, 2017, (3), pp. 371-377. (In Russ.).

9. Paleyev D.Yu., Vasenin I.M., Kosterenko V.N., Shragr E.R. et al. Shock waves during explosions in coal mines. Moscow, Gornoe Delo Publ., Cimmerian Centre LLC, 2011, 312 p. (In Russ.).

10. Fundamentals of practical combustion theory: A training manual for higher education institutions, Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 312 p. (In Russ.).

11. Krishenik P.M., Rumanov E.N. & Shkadinskii K.G. Modeling of combustion wave propagation in a carbon dust/gas mixture. *Combustion and flame*, 1994, (99), pp. 713-722.

12. Lukashov O.Yu., Paleyev D.Yu. & Kraynov A.Yu. Registration Certificate for Computer Software No. 2015616516. "Shock Wave", Right holder: Shakhtekspert-Sistemy LLC (RU). Applic No. 2015613051 dated 17.04.2015; publ. 11.06.2015.

## Acknowledgements

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-71-10034.

## For citation

Kraynov A.Yu., Lukashov O.Yu., Moiseeva K.M. & Kolegov G.A. Effect of coal dust combustion on shockwave intensity of a methane explosion in an underground mine. *Ugol'*, 2022, (9), pp. 73-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-73-78.

## Paper info

Received May 16, 2022

Reviewed July 28, 2022

Accepted August 25, 2022

## SAFETY