

УДК 533

© О. Ю. Лукашов, А. Ю. Крайнов, А. А. Оберемок, 2024

О.Ю. ЛУКАШОВ

канд. физ.-мат. наук,
директор
ООО «Шахтэксперт-Системы», г. Кемерово
e-mail: mail@minesoft.ru

А.Ю. КРАЙНОВ

д-р физ.-мат. наук, проф.,
заведующий кафедрой
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

А.А. ОБЕРЕМОК

аспирант
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
e-mail: oberemokaa@minesoft.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАШЮТНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПРИ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ, ОСЛОЖНЁННОЙ ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОВТОРНОГО ВЗРЫВА

Представлены результаты расчета затухания воздушной ударной волны при аварийном взрыве метана в прямолинейной подготовительной выработке при ее взаимодействии с установленным комплектом противовзрывным быстровозводимым (КПБ). Расчеты показали, что при низком избыточном давлении в набегающей на КПБ воздушной ударной волне (менее 0.03 МПа) избыточное давление в прошедшей за КПБ ударной волне изменяется на малую величину. Получены расчетные зависимости коэффициента затухания воздушной ударной волны при прохождении КПБ от избыточного давления в набегающей волне и доли поперечного сечения выработки, свободной для прохода газа.

Ключевые слова: ВЗРЫВ МЕТАНА В ШАХТЕ, УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, КОМПЛЕКТ ПРОТИВОВЗРЫВНОЙ БЫСТРОВОЗВОДИМЫЙ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Во время ведения горноспасательных работ при угрозе взрыва в горных выработках шахты горноспасателями могут использоваться защитные средства парашютного типа. В [1] рекомендуется использовать крестообразные парашютные преграды,

изготовленные из конвейерной ленты. Площадь купола занимает 0,2–0,3 площади поперечного сечения выработки, в которой устанавливается такая преграда. Допускается установка двух-трех парашютных преград в одном сечении горной выработки. Нагрузка, которую выдерживают такие преграды,

ориентировочно эквивалентна перепаду давления 0,35 МПа. Для оценки эффективности подобных преград в [1] приведены графики для определения коэффициентов ослабления ударной волны (УВ) в зависимости от доли свободного проходного сечения в месте установки парашютной перемычки.

Горным бюро США [2] и ВНИИГД [3] предложено использовать для гашения УВ слабой интенсивности быстровозводимые перемычки парашютного типа. Эти перемычки требуют не более 0,5 ч. на их возведение, и в режиме ожидания они не нарушают проветривание горных выработок. Их устанавливают вблизи сопряжения горных выработок на пути предполагаемого движения УВ. В этом случае происходит не только снижение интенсивности УВ при взаимодействии с преградой, но и осуществляется перераспределение в нужном направлении энергии волны, распространяющейся по выработкам.

Для защиты горноспасателей используется комплект противовзрывной быстровозводимый (КПБ), впервые предложенный в 1974 г. В. М. Плотниковым. Комплект выпускается трех типоразмеров, различающихся площадью купола: 11, 16, 24 м² [4]. При воздействии УВ от взрыва метановоздушной смеси (МВС) комплект КПБ, установленный в выработке, выполняет функцию защиты горноспасателей от воздействия избыточного давления во фронте УВ. Срыв КПБ с креплений происходит при превышении избыточного давления в УВ, равного 0,05 МПа.

Границы зоны поражения при опасности аварийного взрыва метана определяются с помощью действующей методики [5], где используются уравнения газовой динамики для расчета зон поражения УВ. Методика реализована в виде программного кода с удобным интерфейсом [6]. Расчеты по методике [5] позволяют дать рекомендации по местам установки КПБ перед началом проведения работ по ликвидации аварии в угольной шахте.

Целью данной работы является проведение расчетов взаимодействия УВ аварийного взрыва метана в шахте с одним или несколькими КПБ установленными вблизи зоны

потенциального взрыва метана; определение коэффициентов затухания УВ в зависимости от ее интенсивности и доли свободного проходного сечения в месте установки КПБ.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С КПБ В ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ВЫРАБОТКЕ

При расчёте параметров распространения УВ по газодинамической модели в [7–9] было предложено учитывать КПБ скачком площади сечения выработки на малой длине Δx :

$$S(x) = \begin{cases} S, & x \notin \Delta x \\ \alpha S, & x \in \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

где S — площадь сечения выработки; $\alpha = \frac{S_{св}}{S}$, $S_{св}$ — площадь свободного проходного сечения в месте установки КПБ.

На основе газодинамической модели расчета распространения ударных волн [10] проведены расчеты распространения УВ через КПБ, моделируемые скачком площади проходного сечения выработки (1). Были проведены расчеты взаимодействия УВ аварийного взрыва метана в тупике подготовительной выработки с КПБ, расположенными в выработке. Полагалось, что взрыв МВС произошел в тупике прямолинейной выработки и образовал зону протяженностью $\Delta l = 30$ м с температурой $T_b = 980$ К и давлением $P_b = 0,304$ МПа. Длина прямолинейной выработки 4000 м, площадь поперечного сечения 22,85 м², периметр 21,1 м. КПБ с площадью купола 16 м² перекрывает 70 % поперечного сечения выработки.

В выработке установлен один КПБ на расстоянии 1000 м от тупика. На рис. 1 приведена характерная динамика взаимодействия УВ с КПБ (место установки КПБ отмечено синей меткой). УВ при взаимодействии с КПБ частично отражается, УВ меньшей интенсивности проходит за КПБ.

Для характеристики эффективности гашения УВ инженерными взрывозащитными сооружениями, а также в местах сопряжения прямолинейных выработок используется коэффициент затухания УВ, равный отношению

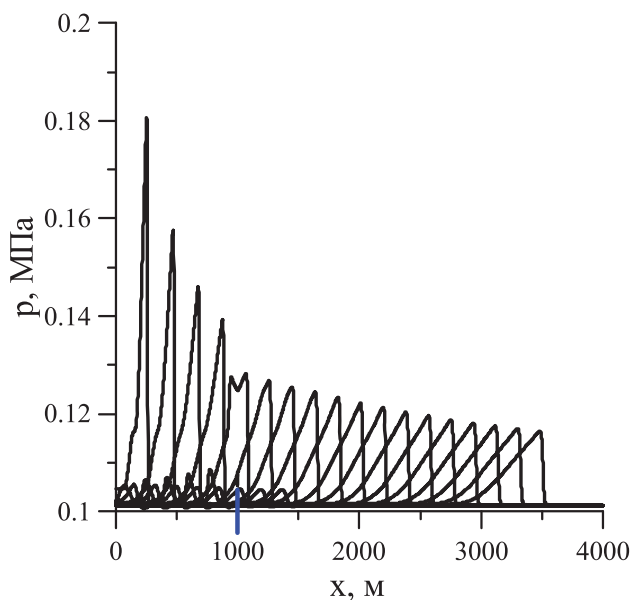


Рис. 1. Распределения давления в последовательные моменты времени с интервалом 0.5 с. КПБ установлен на расстоянии 1000 м от тупика. УВ распространяется слева направо

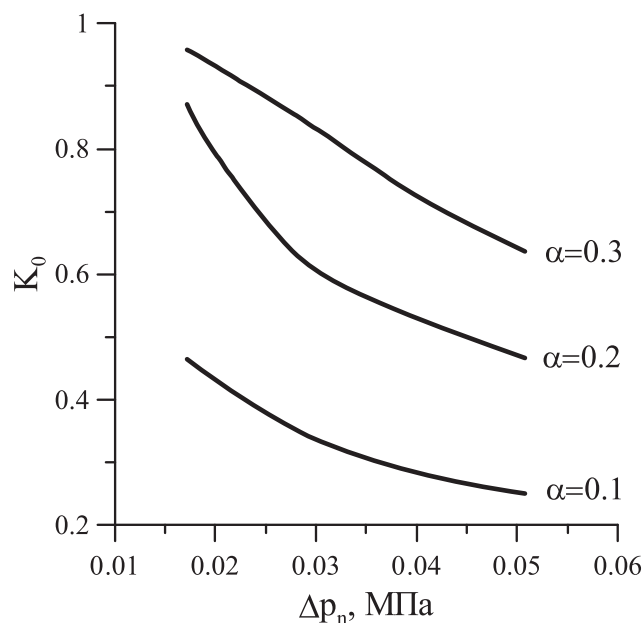


Рис. 2. Коэффициенты затухания УВ при прохождении через КПБ

величин избыточного давления в УВ после взаимодействия с преградой и перед ней (интенсивности набегающей и прошедшей УВ):

$$K_0 = \frac{\Delta p_{out}}{\Delta p_n}, \quad (2)$$

где K_0 — коэффициент затухания УВ; Δp_{out} , Δp_n — избыточное давление в прошедшей за КПБ и набегающей на КПБ УВ.

В соответствии с определением коэффициента затухания УВ чем он больше, тем на меньшую величину уменьшается избыточное давление в прошедшей за КПБ УВ.

На рис. 2 представлены рассчитанные по газодинамической модели с использованием (1) и (2) значения коэффициента затухания УВ в зависимости от избыточного давления в набегающей УВ, Δp_n при различных значениях доли поперечного сечения выработки, свободной для прохода газа α .

Из рис. 2 видно, что при избыточном давлении в набегающей УВ менее 20 кПа при перекрытии 70 % сечения выработки, рекомендованном в [4], коэффициент затухания больше 0,95. Изменение избыточного давления в прошедшей УВ в этом случае составляет всего 5 %. Это указывает на то, что для понижения избыточного давления до величины

6 кПа, являющегося предельным по воздействию на человека без причинения контузии и других травм, использование КПБ с рекомендованным процентом перекрытия проходного сечения в 70 % является неэффективным.

На рис. 3 представлены результаты расчета распространения УВ в случае, когда установлены 3 и 8 КПБ. Видно, что при увеличении количества КПБ с рекомендованным процентом перекрытия проходного сечения в 70 % практически не изменяет интенсивность УВ прошедшей за места установки КПБ.

Проведем расчет интенсивности УВ после прохождения УВ всех КПБ, пользуясь величинами коэффициента затухания, приведенными на рис. 2. В набегающей УВ на первый КПБ избыточное давление $\Delta p_{n1} = 0,0508$ МПа. По данным рис. 2 определяем коэффициент затухания при таком избыточном давлении, $K_{0,1} = 0,65$. По формуле (2) вычисляем избыточное давление в прошедшей за КПБ1 УВ: $\Delta p_{out,1} = K_{0,1} \Delta p_{n1} = 0,65 \cdot 0,0508 = 0,03302$ МПа. Пренебрегаем затуханием УВ за счет трения о стенки выработок при движении волны от КПБ1 до КПБ2, и принимаем, что $\Delta p_{n2} = \Delta p_{out,1}$ и по рис. 2 определяем $K_{0,2} = 0,81$. Вычисляем $\Delta p_{out,2} = \Delta p_{n3} = K_{0,2} \Delta p_{n2} = 0,02675$ МПа.

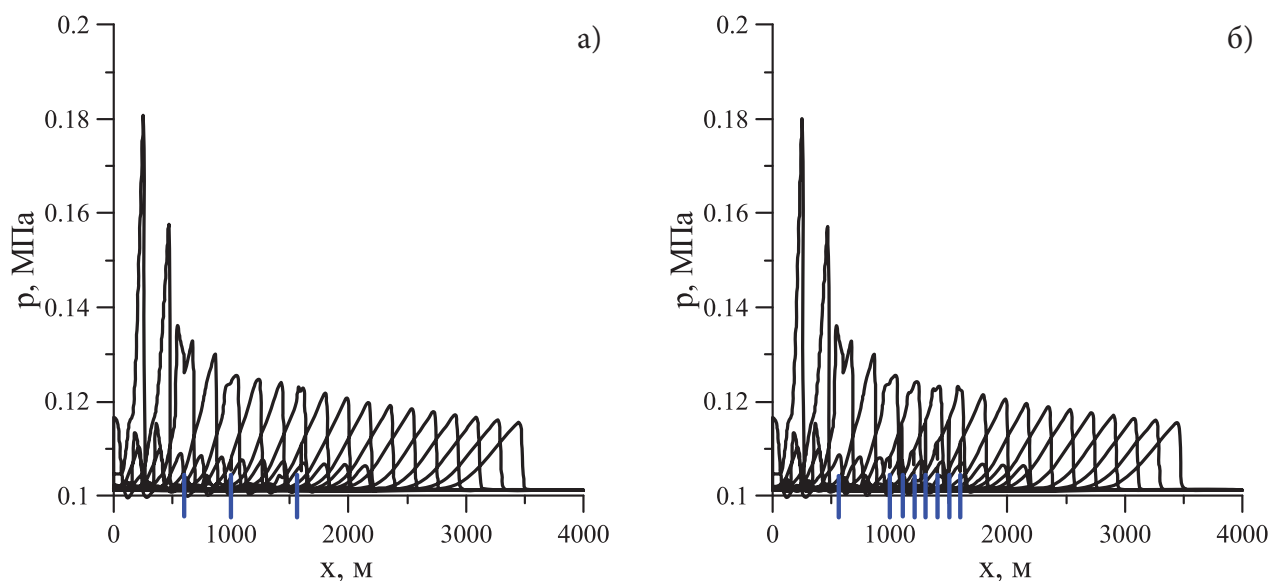


Рис. 3. Распределения давления в последовательные моменты времени с интервалом 0.5 с. а) установлено 3 КПБ на расстоянии 600, 1000, 1600 м от тупика, б) установлено 8 КПБ на расстоянии 600, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600 м от тупика.

Повторяя такие вычисления для третьего и последующих КПБ получим:

$$\begin{aligned}
 K_{0,3} &= 0,88, \\
 \Delta p_{n4} &= 0,02354 \text{ МПа}, K_{0,4} = 0,92, \\
 \Delta p_{n5} &= 0,02165 \text{ МПа}, K_{0,5} = 0,93, \\
 \Delta p_{n6} &= 0,02014 \text{ МПа}, K_{0,6} = 0,96, \\
 \Delta p_{n7} &= 0,01933 \text{ МПа}, K_{0,7} = 0,965, \\
 \Delta p_{n8} &= 0,01866 \text{ МПа}, K_{0,8} = 0,97, \\
 \Delta p_{out8} &= 0,0181 \text{ МПа}.
 \end{aligned}$$

В результате расчета по газодинамической методике [5, 10], приведенного на рис. 2 б для восьми КПБ, избыточное давление во фронте УВ составляет $\Delta p = 0,0202 \text{ МПа}$. Оно выше, чем рассчитанное через коэффициенты затухания. Отличие составляет 10 % и обусловлено тем, что при прохождении УВ от очередного КПБ отраженная волна возвращается к месту установки предыдущего КПБ, взаимодействуя с ним, частично отражается и идет обратно. Из-за этого в областях между установленными друг за другом нескольких КПБ наблюдается более высокое давление, чем в случае установки одиночного КПБ. Это влияет на величину избыточного давления в УВ после прохождения нескольких последовательно установленных КПБ.

Из проведенных на рис. 2 зависимостей коэффициента затухания УВ на КПБ видно, что для понижения избыточного давления

во фронте УВ более эффективно увеличивать долю перекрытия поперечного сечения выработки, чем устанавливать дополнительные КПБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ И СКВОЗНОЙ ВЫРАБОТКАХ С УСТАНОВЛЕННЫМИ КПБ

Был проведен расчет распространения УВ от аварийного взрыва метана в тупике подготовительной выработки с сопряжением со сквозной выработкой (рис. 3). Полагалось, что взрыв МВС произошел в тупике прямой выработки и образовал зону протяженностью $\Delta l = 30 \text{ м}$ с температурой $T_b = 980 \text{ К}$ и давлением $P_b = 0,304 \text{ МПа}$. Длина подготовительной выработки 2000 м, сквозной — 2000 м, по 1000 м вправо и влево от сопряжения с подготовительной под углом 90° . Площадь поперечного сечения всех выработок $22,85 \text{ м}^2$, периметр 21,1 м. В подготовительной выработке установлены 3 КПБ на расстоянии 600, 1000 и 1600 метров от тупика, в сквозной выработке поставлены два КПБ на расстоянии 50 метров от сопряжения. КПБ перекрывает 70 % поперечного сечения выработки.

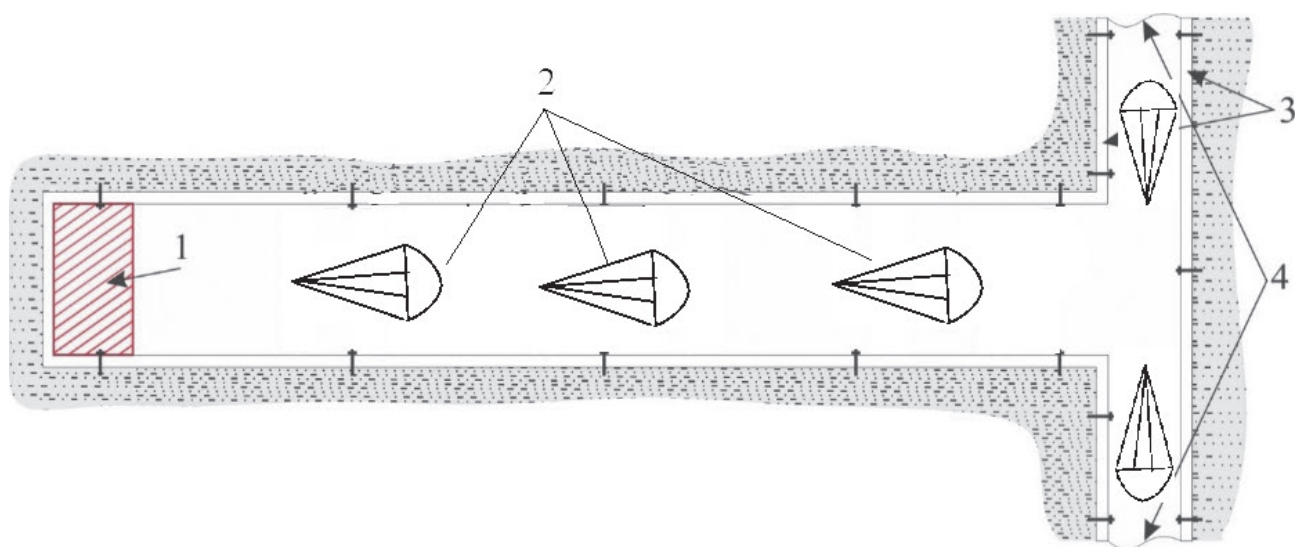


Рис. 4. Схема расположения подготовительной и сквозной выработок. 1 — зона взрыва метана, 2 — КПБ, 3 — борта выработки, 4 — действующая сквозная выработка

На рис. 5 представлены распределения давления в последовательные моменты времени с интервалом 0,5 с после взрыва МВС в тупике. Избыточное давление в УВ уменьшилась при прохождении трех КПБ в подготовительной выработке. При прохождении сопряжения выработок она частично отразилась, частично вышла в ветви сквозной выработки и уменьшила свою интенсивность при взаимодействии с КПБ, установленными в ней на расстоянии 50 м от сопряжения. При перекрытии 70 % сечения выработки интенсивность не уменьшилась до безопасной для человека. При установке КПБ в сквозной выработке при перекрытии более 90 % сечения, избыточное давление во фронте УВ уменьшилось до безопасных величин (предельное допустимое избыточное давление в УВ обозначено зеленой линией на рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты численного решения задачи о затухании УВ при аварийном взрыве метана в прямолинейной подготовительной выработке при ее взаимодействии с установленным КПБ. Расчеты показали, что при низком избыточном давлении в набегающей на КПБ УВ (менее 0,025 МПа) избыточное давление в прошедшей за КПБ УВ уменьшается незначительно. Получены расчетные зависимости коэффициента затухания УВ при

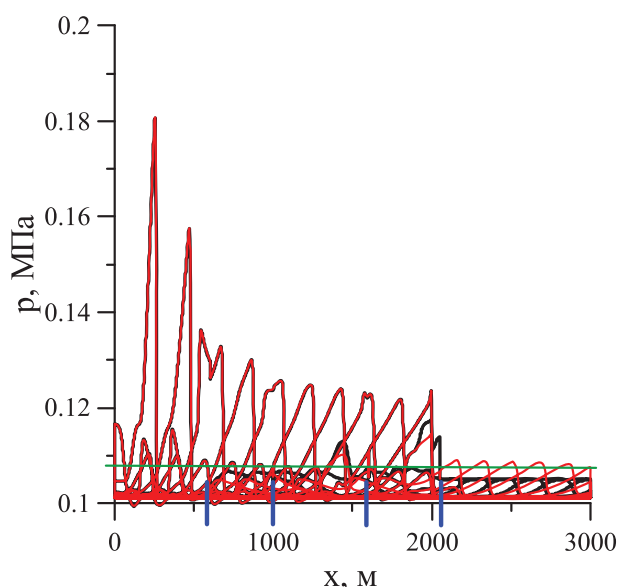


Рис. 5. Распределения давления в последовательные моменты времени с интервалом 0,5 с. Красные линии – все КПБ перекрывают 70% поперечного сечения выработок, черные линии – КПБ, перекрывают в подготовительной выработке 70% сечения и в сквозной 94,5% сечения

прохождении КПБ от избыточного давления в набегающей УВ и доли поперечного сечения выработки, свободной для прохода газа.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. М., 1997. 201 с.
2. Patent 3977312 (USA). Parachute stepping for mine ventilation use / F.N. Kissel // Р. ж. Горное дело. 1977. № 4. 4В81П.
3. Авторское свидетельство 748014 (СССР). Устройство для гашения энергии воздушной ударной волны в горной выработке / В. М. Плотников, А. Н. Дик, В. В. Кирейцев и др. Опубл. Б.И. 1980. № 26.
4. Комплект противовзрывного быстровозводимый (КПБ). Инструкция по эксплуатации КПБ. Всероссийский научно-исследовательский институт горноспасательного дела (ВНИИГД). Караганда. 1982. 63 с.
5. Методика газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли. Министерство энергетики Российской Федерации, Центральный штаб ВГСЧ угольной промышленности. М., 2004. <https://docs.cntd.ru/document/901899801?marker=6580IP>.
6. Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н., Тимченко А. Н., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр». 2011. 160 с.
7. Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю. и др. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем. Томск: Изд. Том.ун-та, 2006. 322 с.
8. Палеев Д. Ю., Васенин И. М., Костеренко В. Н., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Руденко Ю. Ф. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. 312 с.
9. Мазепа Е. Е., Кусаинов П. И., Лукашов О. Ю. Взаимодействие воздушных ударных волн с парашютными перемычками при взрывах в шахтах // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 3. С. 91–95.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616516. «Ударная волна» / Лукашев О. Ю., Палеев Д. Ю., Крайнов А. Ю. Правообладатель ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы» (RU). Заявка № 2015613051, от 17.04.2015; опубл. 11.06.2015.

UDC 533

© O. Y. Lukashov, A. Y. Krainov, A. A. Oberemok, 2024

O.Y. LUKASHOV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Director
Shakhtexpert-Systems LLC, Kemerovo
e-mail: mail@minesoft.ru

A.Y. KRAINOV

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Head of the Department
National Research Tomsk State University, Tomsk
e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

A.A. OBEREMOK

Graduate Student
National Research Tomsk State University, Tomsk
e-mail: oberemokaa@minesoft.ru

DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING PARACHUTE JUMPERS IN THE LIQUIDATION OF AN ACCIDENT COMPLICATED BY THE POSSIBILITY OF A REPEAT EXPLOSION

The results of calculating the attenuation of an air shock wave during an emergency explosion of methane in a rectilinear preparatory mine during its interaction with an installed set of anti-explosive prefabricated. Calculations have shown that at low overpressure in the air shock wave incident on the set of anti-explosive prefabricated (less than 0.03 MPa), the overpressure in the shock wave that followed the set of anti-explosive prefabricated varies by a small amount. The calculated dependences of the attenuation coefficient of the air shock wave during the passage of a set of anti-explosive quick-build overpressure coils in the incoming wave and the proportion of the cross-section of the production free for gas passage are obtained.

Keywords: METHANE EXPLOSION IN A MINE, SHOCK WAVES, EXPLOSION-PROOF PREFABRICATED KIT, NUMERICAL SIMULATION.

REFERENCES

1. The charter of the paramilitary mine rescue unit (VGSh) for the organization and conduct of mine rescue operations at enterprises of the coal and shale industry. M., 1997. 201 p. [In Russ.].
2. Patent 3977312 (USA). Parachute stepping for mine ventilation use / F.N. Kissel // Р. ж. Горное дело. 1977. № 4. 4B81П.
3. Copyright certificate 748014 (USSR). A device for extinguishing the energy of an air shock wave in a mining operation / V. M. Plotnikov, A. N. Dick, V. V. Koreantsev, etc. Publ. B.I. 1980. No. 26. [In Russ.].
4. Explosion-proof pre-fabricated kit (PBC). The instruction manual for the PBC. All-Russian Scientific Research Institute of Mining Rescue (VNIIGD). Karaganda. 1982. 63 p. [In Russ.].
5. The method of gas-dynamic calculation of the parameters of air shock waves in gas and dust explosions. The Ministry of Energy of the Russian Federation, the Central Headquarters of the HCSC of the Coal industry. Moscow, 2004. <https://docs.cntd.ru/document/901899801?marker=6580IP>. [In Russ.].
6. Paleev D. Yu., Lukashov O. Yu., Kosterenko V. N., Timchenko A. N., Vasenin I. M., Shrager E. R., Krainov A. Yu. Computer technologies for solving the tasks of the accident response plan. M.: Publishing house «Mining» LLC «Kimmeriysky Center». 2011. 160 p. [In Russ.].
7. Vasenin I. M., Shrager E. R., Krainov A. Yu., Lukashov O. Yu., etc. Mathematical modeling of gorenje and explosion of high-energy systems. Tomsk: Publishing House of the University, 2006. 322 p. [In Russ.].
8. Paleev D. Yu., Vasenin I. M., Kosterenko V. N., Shrager E. R., Krainov A. Yu., Lukashov O. Yu., Rudenko Yu. F. Shock waves during explosions in coal mines. M.: Publishing house «Mining» LLC «Cimmerian Center», 2011. 312 p. [In Russ.].
9. Mazepa E. E., Kusainov P. I., Lukashov O. Y. Interaction of air shock waves with parachute jumpers during explosions in mines // Physics of combustion and explosion [Fizika goreniya i vzryva]. 2022. Vol. 58. No. 3. P. 91–95. [In Russ.].
10. Certificate of registration of the computer program No. 2015616516. «Shock wave» / Lukashov O. Yu., Paleev D. Yu., Krainov A. Yu. Copyright holder of SHAKHTEXP-Systems LLC (RU). Application No. 2015613051, dated 04/17/2015; published 06/11/2015. [In Russ.].