

УДК 533.6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ПАРАШЮТНЫМИ ПЕРЕМЫЧКАМИ ПРИ ВЗРЫВАХ В ШАХТАХ

Е. Е. Мазепа¹, П. И. Кусаинов¹, О. Ю. Лукашов²

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, mazepaee@minesoft.ru

²ООО «Шахтэксперт-Системы», 650065 Кемерово

Представлены результаты математического моделирования распространения воздушных ударных волн при взрыве метана в горных выработках с учетом их взаимодействия с быстровозводимыми парашютными перемычками. Парашютные перемычки способны снизить интенсивность ударной волны при интенсивности набегающей ударной волны, не превышающей критического давления срыва перемычки. Газодинамическая методика расчета взрывобезопасных расстояний позволяет учитывать парашютные перемычки, установленные в различных местах выработок, и проводить расчет параметров ударных волн, прошедших за перемычку.

Ключевые слова: сеть выработок шахты, взрыв метана, воздушные ударные волны, математическая модель.

DOI 10.15372/FGV20220309

ВВЕДЕНИЕ

Угольные шахты относятся к опасным производственным объектам. Наиболее тяжелыми видами аварий в них являются взрывы метана и угольной пыли. Такие опасные факторы взрыва, как избыточное давление, высокая температура, высокая скорость воздушных потоков и токсичные продукты взрыва, часто приводят к человеческим жертвам и многомиллионным убыткам.

Дополнительную опасность представляют повторные взрывы во время ликвидации аварий в зонах рядом с местом взрыва. Повторные взрывы возникают при нарушении проветривания особо опасных участков шахты, таких как тупиковые выработки. Скорость и точность расчетно-теоретического определения параметров ударной волны влияют на тактику ликвидации аварии.

Для защиты горноспасателей используется комплект противовзрывной быстровозводимый (КПБ), впервые предложенный в 1974 г. карагандинским горноспасателем В. М. Плотниковым. Комплект представляет собой устройство, подобное парашюту, и предназначен для гашения давления во фронте взрывной волны в горных выработках. Для изготовления КПБ применяют материалы, обработан-

ные антипиреновым составом, повышающим огнестойкость готового изделия. Данный комплект выпускается трех типоразмеров, различающихся площадью купола: 11, 16, 24 м². При воздействии воздушной ударной волны, возникающей на аварийном участке от взрыва метановоздушной смеси, комплект КПБ, установленный в выработке, выполняет функцию защиты горноспасателей от воздействия избыточного давления во фронте ударной волны. Срыв КПБ с креплений происходит при превышении давлением ударной волны критического значения.

Границы зоны поражения при первичном и повторных взрывах определяются с помощью специальных отраслевых методик. В России известны три методики [1–3]. Первые две основаны на эмпирических данных. В третьей (действующей) методике [3] используются уравнения газовой динамики для расчета зон поражения ударной волной. Методика реализована в виде программного кода с удобным интерфейсом [4]. Расчеты по методике [3] позволяют дать рекомендации для определения мест установки КПБ перед началом проведения работ по ликвидации аварии на угольном предприятии.

Целью данной работы является модификация имеющегося метода определения зоны поражения при взрыве метановоздушной смеси с целью учета взаимодействия ударной волны с КПБ.

Для достижения поставленной цели выде-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-71-10034).

© Мазепа Е. Е., Кусаинов П. И., Лукашов О. Ю., 2022.

лены следующие задачи: модификация математической модели действующей методики в целях учета взаимодействия ударной волны с КПБ; модификация программной реализации расчета распространения воздушных ударных волн в сети выработок шахты.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель распространения воздушной ударной волны в разветвленной сети горных выработок описывается системой нестационарных газодинамических уравнений. Подробное описание модели представлено в [5, 6]. Движение газа в прямолинейных участках выработок моделируется квазиодномерными уравнениями газовой динамики, где в правых частях учитываются процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками [7]. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии газа и плотности продуктов сгорания имеют вид:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u S}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{fr} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = q \Pi, \quad (4)$$

$$p = \rho R T, \quad (5)$$

$$E = c_v T + u^2/2.$$

Течение газа в области изменения конфигурации и сечения горных выработок (сопряжения горных выработок, примыкания вертикальных выработок, повороты) описывается трехмерными уравнениями газовой динамики [5, 6].

В предположении, что известны координаты, протяженность, параметры состояния среды после взрыва в зоне взрыва, а также параметры рудничной атмосферы, ставятся следующие начальные условия для прямолинейных участков выработок:

$$p(x, 0) = \begin{cases} p_b, & x \in \text{ВМ}, \\ p_0, & x \notin \text{ВМ}, \end{cases} \quad (6)$$

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_b, & x \in \text{ВМ}, \\ T_0, & x \notin \text{ВМ}, \end{cases}$$

$$\rho_f(x, 0) = \begin{cases} \rho_f, & x \in \text{ВМ}, \\ 0, & x \notin \text{ВМ}, \end{cases} \quad u(x, 0) = 0. \quad (7)$$

Граничные условия для уравнений (1)–(4): если граница выработки — тупик или изолирующая перемычка, используется условие непротекания

$$u(0, t) = 0; \quad (8)$$

если выработка выходит на поверхность —

$$p(L, t) = p_0, \quad \rho(L, t) = \rho_0. \quad (9)$$

В правых частях уравнений (3), (4) учитываются трение потока газа о стенки выработки и теплообмен газа со стенками. Для этого используются эмпирические зависимости [7, 8]: для силы трения потока о стенки:

$$\tau_{fr} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, \quad (10)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u D_{eq}}{\mu}, \quad D_{eq} = \frac{4S}{\Pi}.$$

для удельного теплового потока в стенки:

$$q = \alpha(T_l - T), \quad \text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.47} A, \quad (11)$$

$$\text{Pr} = \mu c_v / \lambda_g, \quad \text{Nu} = \alpha D_{eq} / \lambda_g,$$

$$A = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{opt}}{l/\delta}\right) & \text{при } \frac{l}{\delta} > 13, \\ \exp\left(\frac{l/\delta}{(l/\delta)_{opt}}\right) & \text{при } \frac{l}{\delta} < 13. \end{cases}$$

Принятые обозначения: t — время; x — ось декартовой системы координат; ρ — плотность газа; ρ_f — парциальная плотность продуктов сгорания; u — скорость; p — давление; E — полная энергия газа; T — температура; S — площадь сечения канала; Π — периметр сечения канала; τ_{fr} — сила трения о стенки; q — удельный тепловой поток в стенки; R — газовая постоянная; c_v — удельная теплоемкость при постоянном объеме; p_0, T_0 — атмосферные значения давления и температуры; p_b, T_b — параметры в зоне взрыва; ВМ — зона взрыва метана; α — коэффициент теплообмена; T_l —

температура стенок выработки; L — длина выработки; Nu — число Нуссельта; Pr — число Прандтля; λ_g — теплопроводность газа; c_f — коэффициент сопротивления; Re — число Рейнольдса; μ — вязкость газа; D_{eq} — эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка горной выработки; A — поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена; l — характерное расстояние между выступами шероховатости; δ — характерная величина выступа. Индексы: 0 — атмосферные условия, b — параметры в зоне взрыва, f — продукты сгорания.

Построение расчетной области проводится путем разбиения ветвей сети горных выработок на независимые конечные объемы — ячейки. Полное описание этого подхода представлено в работе [9].

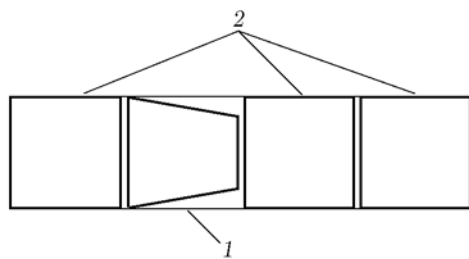


Рис. 1. Моделирование парашютной перемычки:

1 — разностная ячейка, моделирующая парашютную перемычку, 2 — разностная ячейка в выработке

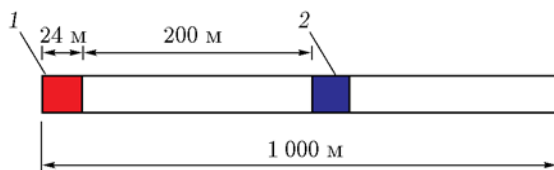
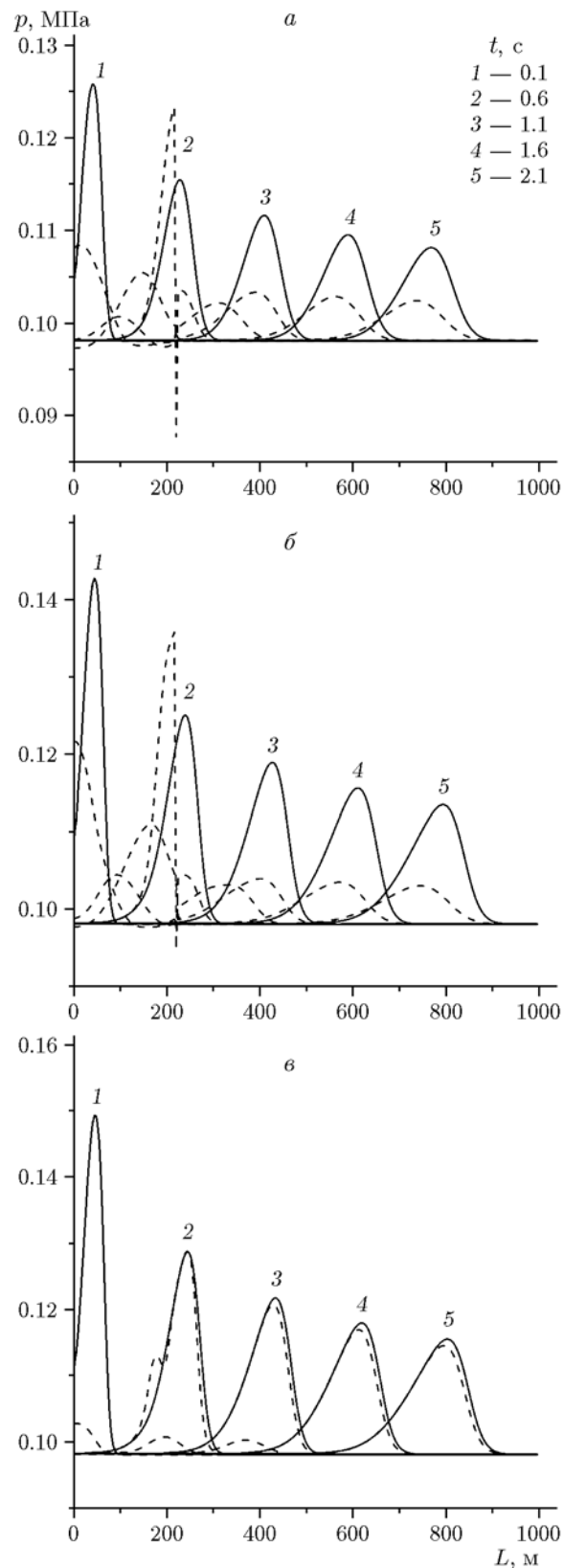


Рис. 2. Схема расчетной области прямолинейного участка:

1 — зона повышенного давления, 2 — место установки КПБ

Рис. 3. Распределение давления по длине выработки в фиксированные моменты времени: a — $p_b = 1.5$ атм, b — $p_b = 1.85$ атм, $в$ — $p_b = 2$ атм; сплошные линии — без установки КПБ, штриховые линии — при наличии КПБ



Определение мест постановки КПБ в ветвях сети выработок моделируется путем изменения площади сечения выработки на одном конечном объеме до значения площади отверстия в КПБ. Для этого используется разностная сетка с переменной площадью проходного сечения (рис. 1).

При повышении избыточного давления в ячейке с установленным КПБ более чем на 0.5 атм происходит его разрушение с изменением площади проходного сечения ячейки на первоначальное, до установки КПБ.

Для решения системы уравнений (1)–(5) используется метод Годунова [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Численное моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с КПБ проводилось на примере прямой тупиковой выработки длиной $L = 1000$ м (рис. 2). Зона взрыва метана (повышенного давления) протяженностью 24 м расположена в тупике выработки. Расчетная область разбита на равномерные кубические объемы длиной 4 м. Расчеты проведены при значениях давления в зоне взрыва метана 1.5, 1.8 и 2.0 атм. КПБ установлен на расстоянии 200 м от зоны повышенного давления. Площадь проходного сечения в месте установки КПБ 1 м^2 . Условием разрушения КПБ является превышение избыточным давлением перед КПБ значения 0.5 атм.

На рис. 3 представлено распределение давления по длине выработки в фиксированные моменты времени. Видно, что ударная волна, достигая КПБ, частично отражается в обратном направлении, при этом интенсивность ударной волны, прошедшей за КПБ, уменьшается.

На рис. 4 показано изменение давления во времени в контрольной точке с установленным КПБ и без него. Контрольная точка находится на расстоянии 16 м от места установки КПБ, по направлению распространения ударной волны. Из полученных результатов, представленных на рис. 3 и 4, следует, что после преодоления КПБ интенсивность ударной волны понижается в три раза. В случае разрушения КПБ интенсивность ударной волны не изменяется.

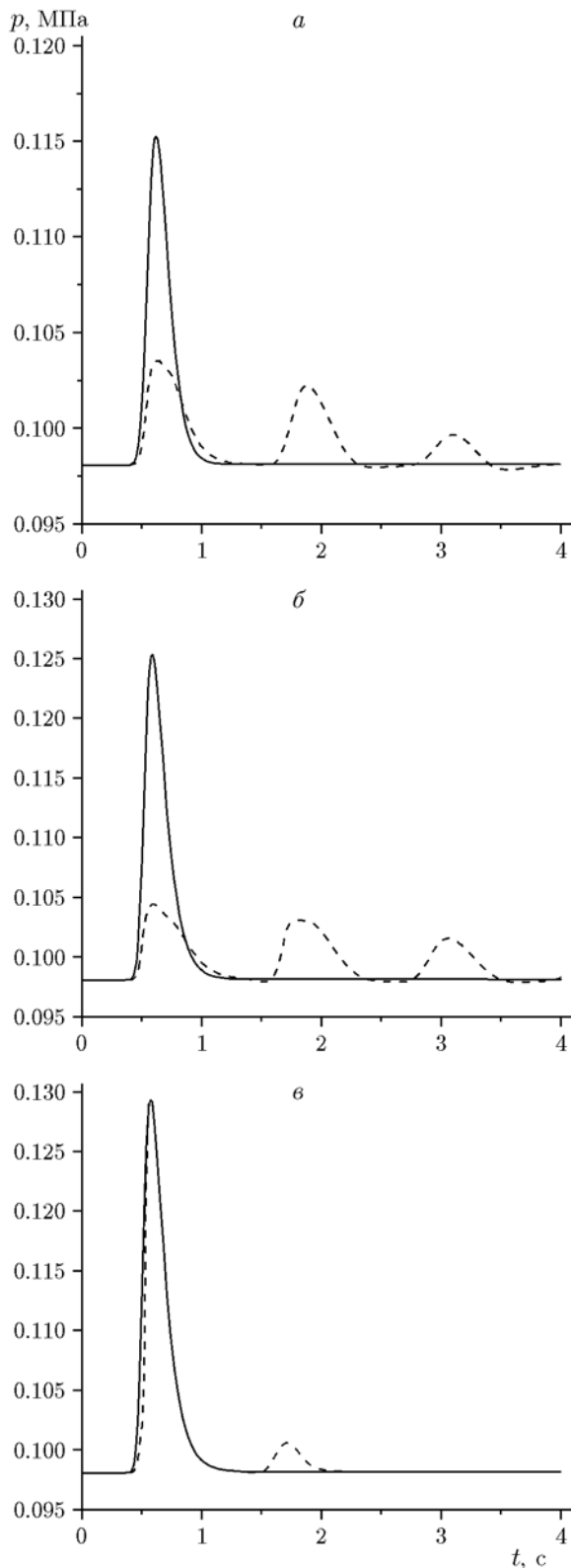


Рис. 4. Изменение давления во времени в контрольной точке:

a — $p_b = 1.5$ атм, b — $p_b = 1.85$ атм, v — $p_b = 2$ атм; сплошные линии — без установки КПБ, штриховые линии — при наличии КПБ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты моделирования распространения воздушных ударных волн в выработках шахты при взрыве метана с учетом их взаимодействия с парашютными перемычками. Парашютные перемычки способны снизить интенсивность ударной волны при интенсивности набегающей ударной волны, не превышающей критического давления срыва перемычки. Газодинамическая методика расчета взрывобезопасных расстояний позволяет учитывать наличие парашютных перемычек, установленных в различных местах выработок, и проводить расчет параметров ударных волн, прошедших за перемычку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Устав ВГСЧ** по организации и ведению горноспасательных работ. — М.: Недра, 1986.
2. **Устав** военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. — М., 1997.
3. **Методика** газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли / М-во энергетики Российской Федерации, Центральный штаб ВГСЧ угольной пром-ти. — М., 2004. — <https://docs.cntd.ru/document/901899801?marker=6580IP>.
4. 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.: Горное дело, ООО «Киммерийский центр», 2011.
5. Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Палеев Д. Ю., Потапов В. П., Рашевский В. В., Артемьев В. Б., Руденко Ю. Ф., Костеренко В. Н. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006.
6. 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.: Горное дело, ООО «Киммерийский центр», 2011.
7. **Справочник** по теплообменникам: в 2 т. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1.
8. Исаченко В. П., Осипова В. Ф., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975.
9. Мазепа Е. Е., Кусаинов П. И., Лукашов О. Ю., Крайнов А. Ю. О численном решении задачи распространения воздушных ударных волн в горных выработках шахты // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. — 2020. — № 64. — С. 108–120. — DOI: 10.17223/19988621/64/8.
10. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.

Поступила в редакцию 27.12.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.