

УДК 622.812:622.814:533

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ВЫРАБОТКЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ ПРЕГРАДАМИ**

**В. М. Фомин^{1,2}, Б. В. Постников^{1,2}, В. А. Колотиллов^{1,2},
В. С. Шалаев³, Ю. В. Шалаев³, Н. Ф. Флоря³**

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
E-mail: fomin@itam.nsc.ru, ул. Институтская, 4/1, 630090, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет,
E-mail: b.postnikov@nsu.ru, ул. Пирогова, 1, 630090, г. Новосибирск, Россия*

³*ООО “Научно-производственное предприятие “Шахтпожсервис”,
E-mail: florya@shps.ru, ул. Кирова, 32, 650000, г. Кемерово, Россия*

Представлены результаты численного моделирования распространения интенсивной ударной волны после взрыва в горной выработке с установленным проницаемым заслоном. Задача решена в рамках равновесной невязкой постановки без учета химических реакций с осреднением состава атмосферы в выработке. Показано, что для заслона, состоящего из четырех одинаковых проницаемых преград, расположенных в лабиринтном порядке, набегаящая ударная волна оказывает наибольшее силовое воздействие на первую преграду. В результате ослабления ударно-волнового фронта на ней, остальные преграды нагружены значительно меньше. Для снижения пиковых нагрузок на силовой каркас следует снижать площадь фронтальных плоских поверхностей металлоконструкций.

Ударная волна, горная выработка, взрыв, проницаемая преграда

DOI: 10.15372/FTPRPI20190103

В угольных шахтах одним из факторов риска возникновения аварий является взрыв пылеметановоздушных смесей, причем крупные аварии в угольных шахтах практически неизбежны [1, 2]. Понимание динамики развития ударно-волновых процессов, происходящих как в момент взрыва, так и по мере прохождения ударно-волнового фронта по разветвленным каналам шахт, — ключевое для создания эффективных средств и способов защиты. ООО “НПП “Шахтпожсервис” разработана система контроля рудничной атмосферы, горного массива и снижения поражающих факторов взрыва [3]. В состав системы входит средство взрывозащиты горных выработок — заслон, предназначенный для ослабления ударно-волнового воздействия на объекты защиты, гашения пламени, а также для снижения запыленности и задымленности [4]. Заслон представляет собой комплекс, состоящий из четырех проницаемых преград, расположенных на определенном расстоянии друг от друга в лабиринтном порядке, водяной завесы и узла управления водяной завесой.

Проницаемые преграды позволяют ослабить ударно-волновой фронт и снизить воздействие на конструкции самих преград по сравнению с непроницаемыми. Моделирование распространения ударных волн взрыва в горных выработках является актуальной задачей для оценки параметров воздействия на проницаемые преграды. Расчет распространения ударных волн от взрыва в каналах с произвольной геометрией и многофазной газовой атмосферой представляет собой сложную задачу и требует при моделировании учета всех особенностей геометрии и физико-химических процессов, происходящих за фронтом ударной волны.

В настоящей работе задача о прохождении ударной волны через заслон из проницаемых преград решалась в двумерном приближении в рамках равновесной невязкой постановки без учета химических реакций с осреднением состава атмосферы в выработке. Это позволило получить основные газодинамические параметры развития ударно-волнового процесса.

Геометрия расчетной области задавалась на основе чертежей размещения сетчатых преград на одинаковом расстоянии друг от друга в выработке с арочным креплением. Поставленная задача описывается системой нестационарных уравнений, характеризующих течение невязкого равновесного газа без учета химических реакций и интегрально учитывающих смеси состав газа:

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\phi\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{V} \cdot \vec{V}) = -\nabla p + S_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\phi\rho E)}{\partial t} + \nabla(\vec{V}(\rho E + p)) = 0, \quad (3)$$

$$p = \rho \frac{RT}{M}, \quad (4)$$

$$E = C_v T, \quad C_p - C_v = R, \quad C_p = \text{const}, \quad (5)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \rho_i + \sum_{m=5}^6 \rho_m, \quad (6)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^4 k_i C_{p_i} + \sum_{m=5}^6 k_m C_{p_m}, \quad (7)$$

$$S_n = -C_0 V^2, \quad (8)$$

$$C_0 = \text{const}, \quad (9)$$

$$\phi = \text{const}. \quad (10)$$

Здесь ϕ — пористость; ρ — плотность смеси; ρ_i — плотность i -й газовой компоненты смеси; ρ_m — плотность m -й негазовой компоненты смеси; V — скорость смеси; p — давление смеси; S_n — потеря импульса смеси в области пористости; t — время; E — внутренняя энергия смеси; T — температура смеси; R — универсальная газовая постоянная; M — молярная мас-

са смеси; C_v — теплоемкость смеси при постоянном объеме; C_p — теплоемкость смеси при постоянном давлении; C_{p_i} — теплоемкость i -й газовой компоненты смеси при постоянном давлении; C_{p_m} — теплоемкость m -й негазовой компоненты смеси при постоянном давлении; α_i — объемная концентрация i -й газовой компоненты смеси; k_i — массовая концентрация i -й газовой компоненты смеси; k_m — массовая концентрация m -й негазовой компоненты смеси; C_0 — коэффициент в законе сопротивления среды.

Геометрия расчетной области представлена на рис. 1 (L — длина расчетной области; A — область водяной завесы; B — ширина расчетной области; b — длина преграды; h — ширина преграды; l — расстояние между преградами I и IV). Уравнения неразрывности (1), сохранения количества движения (2), сохранения энергии (3) ограничивались двумерным случаем. Рассматривался идеальный газ (4) с постоянной теплоемкостью (5). Учет наличия воды и угольной пыли осуществлялся по соотношениям (6) и (7) в интегральном виде. В области течения вне зоны проницаемых преград задействованы уравнения (1)–(7), где принято $S_n = 0$, $\phi = 1.0$. Течение в газопроницаемой области описывалось полной системой уравнений (1)–(10), значение ϕ для преграды принималось 0.42, что соответствовало осредненным характеристикам пористости преград серийных заслонов.

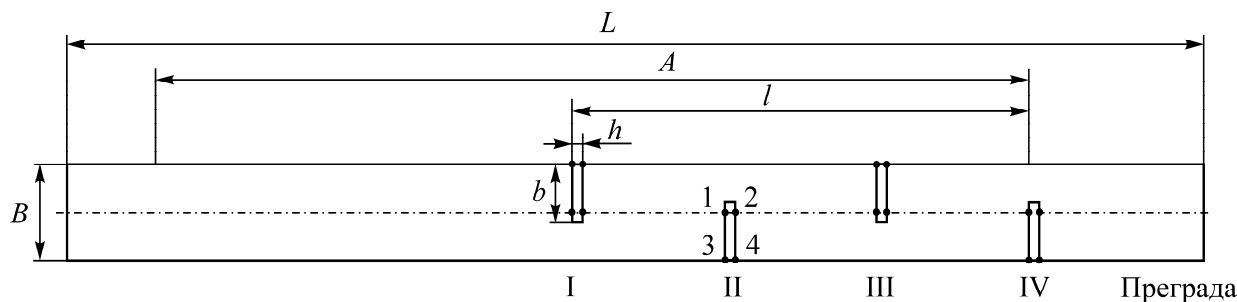


Рис. 1. Геометрия расчетной области. Основные геометрические соотношения: $L=65$ м; $A/L=0.77$; $l/L=0.4$; $b/B=0.62$; $h/b=0.18$. На примере преграды II показан метод маркировки расчетных точек: по оси симметрии выработки пара 1–2, на стенке — 3–4

Также проведены расчеты с $\phi = 0$, что соответствует непроницаемой преграде. Состав атмосферы в выработке: CH_4 — 10 %; O_2 — 19; N_2 — 70; Ar — 1 %; концентрация твердых частиц (угольной пыли) — 100 мг/м^3 ; средняя объемная концентрация воды в горной выработке — 0.14 л/м^3 . Коэффициент C_0 выбирался исходя из анализа работ [5–8], α_i рассчитывались из состава атмосферы, остальные величины из (6), (7) выбирались из базы данных свойств материалов Ansys-Fluent с учетом [9]. В начальный момент времени во всей расчетной области задавалось абсолютное давление 0.1 МПа, на левой границе выработки — абсолютное давление 0.7 МПа.

Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. В процессе расчета формировался ударно-волновой фронт,двигающийся слева направо по выработке в направлении первой преграды. Расчет прекращался по достижении правой границы выработки. Для решения уравнений (1)–(10) в ANSYS Fluent использовался решатель density-based AUSM Flux Type, модуль расчета течения в пористой среде, явная схема второго порядка точности, структурированная расчетная сетка состояла из 150 тыс. ячеек, шаг по времени — 0.3 мс.

В расчете заслона с непроницаемыми преградами ударная волна, двигаясь от левого конца выработки, сначала отражается от первой преграды, при этом давление на поверхности преграды существенно увеличивается (рис. 2). На вторую преграду продолжает движение фронт ударной волны, прошедший между торцом первой преграды и правым бортом выработки. Далее происходит отражение ударной волны от поверхности второй преграды. В промежуток между торцом второй преграды и левым бортом выработки проходит фронт ударной волны, сформированной в результате многочисленных отражений от бортов выработки и тыльной стороны первой преграды. В результате до конца выработки за счет многократных отражений и вследствие высокого молекулярного веса осредненной газовой смеси, эффекта водяной завесы интенсивность ударно-волнового воздействия значительно ослабевает. Особенностью расчетов с проницаемыми преградами является то, что кроме отражения ударной волны от поверхности первой преграды, область высокого давления преодолевает преграду и за преградой также формируется ударно-волновой фронт,двигающийся в сторону правого конца выработки. Результирующая интерференционная ударно-волновая картина существенно усложняется по мере прохождения ударно-волнового фронта к четвертой проницаемой преграде. За счет проницаемости нагрузка на первую преграду после отражения ударно-волнового фронта существенно снижается. Наиболее нагруженной следует считать первую и в меньшей степени вторую преграду. Ввиду ослабления ударно-волнового фронта, третья и четвертая преграды нагружены значительно меньше.

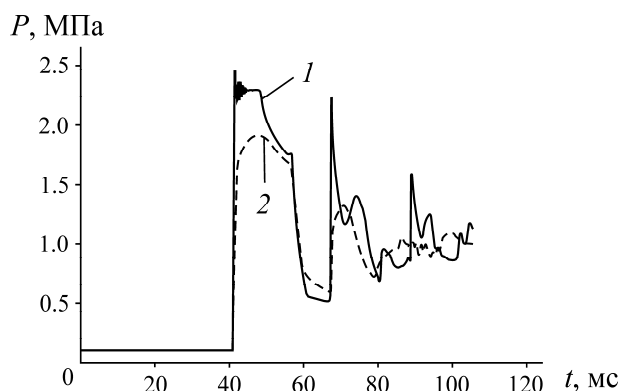


Рис. 2. Зависимость давления от времени на фронтальной поверхности первой преграды на оси симметрии выработки: 1 — непроницаемая преграда; 2 — проницаемая преграда

Поскольку для силового каркаса преград заслона характерно высокое значение площади плоских фронтальных поверхностей силовых элементов, расчеты динамики давления вблизи непроницаемой ($\phi = 0$) первой преграды следует считать предельным случаем нагрузки на силовой каркас преград заслона. Согласно расчетам, пиковое импульсное давление достигает в этом случае 2.45 МПа (рис. 2), продолжительность импульса давления после первого отражения ударной волны 20 мс. Особое внимание следует уделить непроницаемым угловым конфигурациям, где вследствие многократного переотражения ударных волн могут возникать повторные интенсивные пиковые нагрузки 2.2 – 2.4 МПа (рис. 2).

Проницаемость преград существенно снижает давление P на фронтальной поверхности первой преграды — 1.75 МПа (рис. 2). Нахождение фронтом давления проницаемой преграды требуется время, поэтому повышение давления на тыльной поверхности преграды происходит с задержкой, не компенсируя таким образом в полной мере первоначальный высокий перепад давления между фронтальной и тыльной сторонами преграды.

Зависимость разницы давления ΔP между точками 3 и 4 на первой проницаемой преграде показана на рис. 3. Продолжительность существования перепада давления на преграде в расчетных точках, начиная от скачка давления на фронтальной поверхности (точка 3) до момента уравнивания давлений на фронтальной и тыльной поверхности преграды (точки 3, 4), составляет 46.8 мс, пиковый перепад давления — 1.61 МПа, средний перепад давления за указанный промежуток времени — 0.71 МПа.

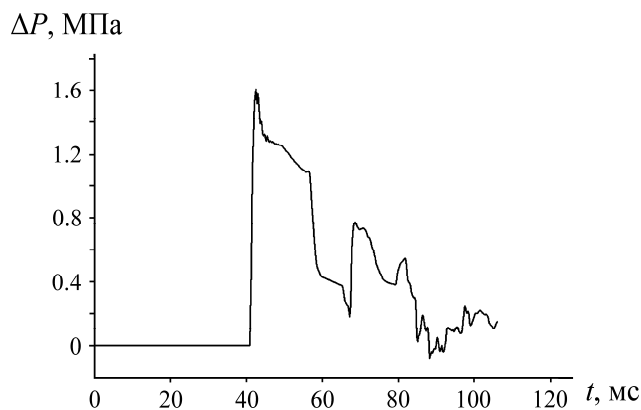


Рис. 3. Разница давлений между точками 3 и 4 на первой проницаемой преграде

На рис. 4 приведены данные о максимальном давлении при отражении ударной волны от фронтальной поверхности преград P_s в расчетных точках 1 и 3 в зависимости от их относительного местоположения $x_1 = x/l$ (x — координата вдоль оси симметрии выработки, за нулевую точку отчета выбрана расчетная точка 1 на фронтальной поверхности первой преграды). Видно, что по мере прохождения фронтом заслона ударно-волновая нагрузка на преграды за счет проницаемости снижается.

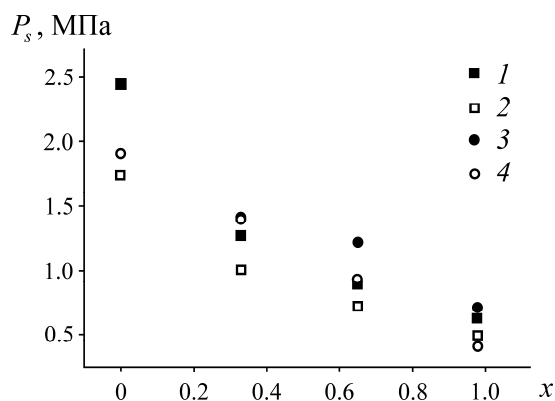


Рис. 4. Зависимость давления в момент отражения ударной волны от фронтальной поверхности преграды от местоположения преград: 1 — непроницаемая преграда, точка 1; 2 — проницаемая преграда, точка 1; 3 — непроницаемая преграда, точка 3; 4 — проницаемая преграда, точка 3

Для ударно-волновых процессов характерно с течением времени возникновение областей с аномальными газодинамическими параметрами. На рис. 5 показано появление повторного, более интенсивного, пика давления на оси симметрии второй преграды для расчета с непроницаемыми стенками, где этот эффект наиболее выражен.

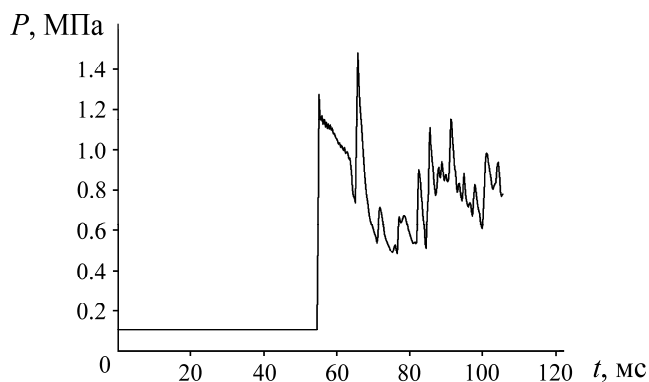


Рис. 5. Повторный пик давления на второй непроницаемой преграде

Области высокого давления могут возникать в пространстве выработки на короткие промежутки времени. После отражения от первой проницаемой преграды ударная волна достигает правого борта выработки, в результате повторного отражения возникает перемещающаяся вдоль правого борта выработки в обратном направлении область аномально высокого давления величиной до 2.3 МПа (рис. 6). Время существования области незначительное и не превышает 10 мс.

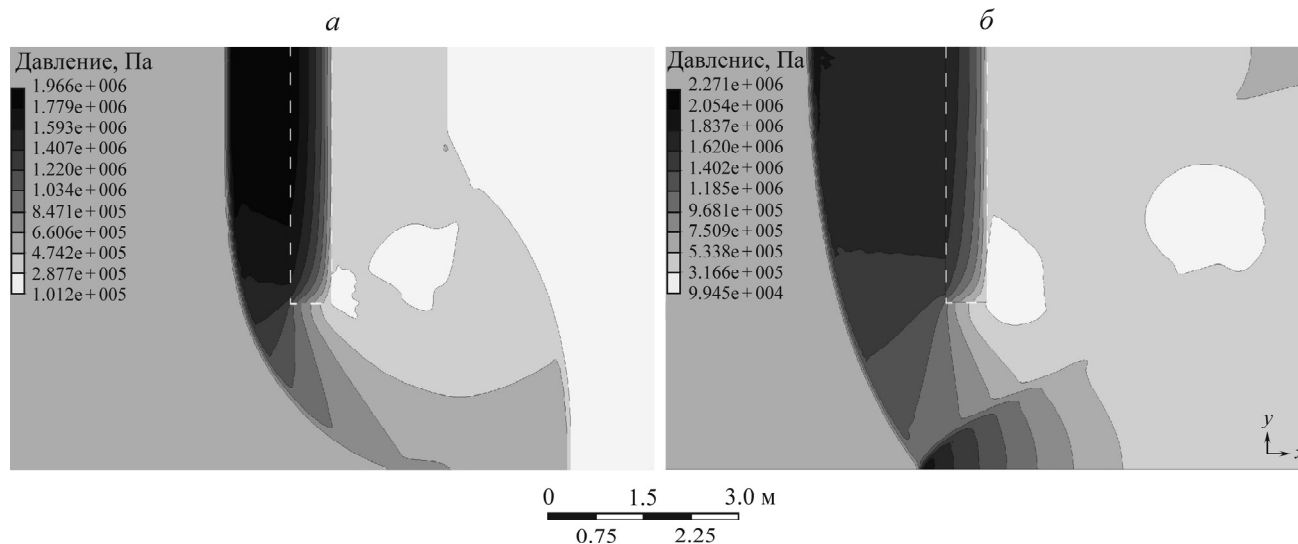


Рис. 6. Поле давлений. Перемещающаяся область аномального давления вблизи правого борта выработки. Время с начала проведения расчета: а — 47.0 мс; б — 52.5 мс

ВЫВОДЫ

В исследованных конфигурациях заслона набегающая ударная волна оказывает наибольшее силовое воздействие на первую преграду. В результате ослабления ударно-волнового фронта на ней, остальные преграды нагружены значительно меньше. Увеличение проницаемости первой преграды позволяет более равномерно распределить давление от набегающей ударной волны между преградами заслона. После отражения от преграды на ее поверхности за фронтом отраженной ударной волны формируется область высокого давления, в несколько раз превышающего давление за фронтом набегающей ударной волны. Данный эффект является одним из ключевых при разработке и проектировании перспективных проницаемых заслонов. Для снижения пиковых нагрузок на силовой каркас следует снижать площадь фронтальных плоских поверхностей и избегать объемных полузамкнутых конфигураций для предотвращения кумулятивного роста давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Скрицкий В. А. Взрывы метана на высокопроизводительных участках угольных шахт и причины их возникновения // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 71–78.
2. Абрамов В. В., Брилев М. Г., Абрамов О. В. Возможно ли избежать крупных аварий в угольных шахтах? // Безопасность труда в пром-ти. — 2018. — № 7. — С. 48–53.
3. Пат. 2400633 РФ. Система локализации и подавления взрывов метановоздушных смесей и/или угольной пыли в сети горных выработок / В. С. Шалаев, А. В. Шалаев, Ю. В. Шалаев; заявл. 15.06.2009 // Опубл. в БИ. — 2010. — № 27. — С. 9.
4. Шалаев В. С., Шалаев Ю. В., Флоря Н. Ф. Средства взрывозащиты горных выработок угольных шахт и их испытания // Безопасность труда в пром-сти. — 2015. — № 5. — С. 46–49.
5. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефт. и горн. лит-ры, 1960. — 254 с.
6. Белов С. В. Пористые проницаемые материалы. — М.: Metallurgy, 1987. — 335 с.
7. Миронов С. Г., Колотилов В. А., Маслов А. А. Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокопористых ячеистых материалов // Теплофизика и аэромеханика. — 2015. — Т. 22. — № 5. — С. 599–607.
8. Постников Б. В., Ломанович К. А., Пономаренко Р. А. Воздействие газопроницаемых материалов с изменяемой пористостью на отрывное течение при сверхзвуковом обтекании прямого уступа // Теплофизика и аэромеханика. — 2018. — Т. 25. — № 2. — С. 199–205.
9. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.

Поступила в редакцию 10/XII 2018

После доработки 12/II 2019

Принята к публикации 29/I 2019