

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.812:622.814:533

СНИЖЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ВЗРЫВА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПРЕГРАД

В. М. Фомин, Б. В. Постников, В. А. Колотилов

*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*

В рамках равновесной невязкой постановки проведено численное моделирование прохождения ударной волны по выработке с расположенными в ней проницаемыми преградами. Исследованы наклонные и дуговые преграды, пористость преград варьировала в диапазоне от 0 до 0.8. Наклонные и дуговые преграды снижают нагрузку на конструкцию преграды при прохождении фронта ударной волны за счет формирования косой или радиальной, в случае с дуговой преградой, отраженной ударной волны. С увеличением пористости преграды нагрузка дополнительно может быть снижена, однако преграды с высокой проницаемостью снижают эффективность работы заслона, что подтверждается повышенным перепадом давления на ударно-волновом фронте после прохождения им заслона.

Ударная волна, горная выработка, взрыв, проницаемая преграда

DOI: 10.15372/FTPRPI20200501

Угольные шахты — сложная пространственная разветвленная система каналов, суммарная протяженность которых может достигать сотен километров. Такая система каналов не является изолированной, так как происходит постоянная инфильтрация газов через стенки. Полное численное моделирование всех газодинамических процессов, происходящих внутри угольной шахты после взрыва пылеметаносодержащего газа, представляет собой значительные трудности, как с точки зрения привлекаемых вычислительных ресурсов, так и используемых математических моделей процесса. В связи с этим необходимо вычленять наиболее важные детали происходящих процессов, применять упрощенные методы и модели описания газовой среды выработок и залегающего пласта.

Взрыв пылеметановоздушных смесей является значимым фактором опасности в угольной шахте [1]. Определить время и место такого события затруднительно, поэтому на практике применяются превентивные меры защиты, направленные на недопущение формирования в горной выработке условий возникновения взрыва и борьбу с его последствиями, т. е. снижение интенсивности ударных и детонационных волн. Одно из таких средств защиты — установка последовательно расположенных проницаемых перегородок [2, 3]. В [4] методами численного моделирования исследована работа заслона, состоящего из расположенных со смещением проницаемых преград, пористость которых соответствует живому сечению промышленных заслонов.

Цель настоящей работы — исследование влияния геометрической формы проницаемых преград и их пористости на развитие ударно-волновых процессов в горной выработке. Геометрия выработки и расположение преград основаны на данных [4]. Изучены наклонные преграды, представляющие собой плоские преграды, наклоненные под углом 45° относительно борта выработки, и дуговые (их форма определяется четвертью дуги окружности). При выборе формы преграды руководствовались принципом простоты изготовления предлагаемых форм и свойством угловых конфигураций формировать вблизи своих фронтальных поверхностей косые скачки уплотнения. Это существенно снижает силовое воздействие на конструкцию преграды в отличие от случая, когда фронт ударной волны и поверхность преграды параллельны. Геометрия исследованных заслонов показана на рис. 1.

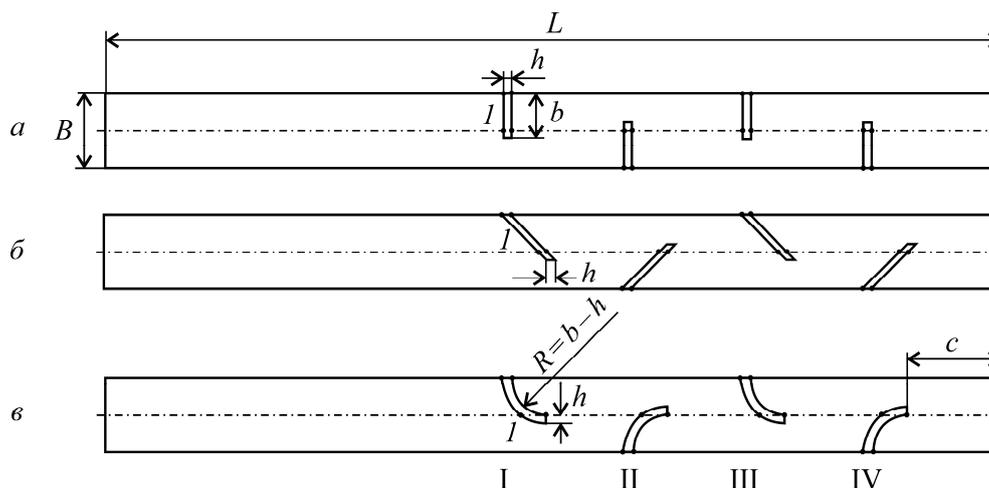


Рис. 1. Геометрия расчетной области для плоских преград (а), наклоненных под углом 45° (б) и образованных дугой окружности (в): I–IV — преграды; $B/L=0.08$, $b/B=0.6$, $h/b=0.2$, $c/B=0.8$; l — точка, в которой детально анализировалось изменение давления

Задача решалась в двумерной постановке в равновесном невязком приближении. Химические реакции в области взаимодействия не учитывались. В систему уравнений, описывающих задачу для двумерного нестационарного случая, входят уравнения неразрывности, сохранения количества движения, сохранения энергии. Газ принимался идеальным с постоянной теплоемкостью. Учет наличия воды и угольной пыли осуществлялся в интегральном виде [4]. Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent с помощью решателя density-based AUSM Flux Type, модуля расчета течения в пористой среде, явной схемы второго порядка точности. Неструктурированная расчетная сетка состояла из 900 тыс. ячеек, шаг по времени 0.1 мс.

Для сравнения с данными, полученными в [4] для плоских преград, рассчитаны наклонные и дуговые преграды при пористости 0.4. Влияние пористости преград на развитие ударно-волнового процесса в выработке продемонстрировано на примере дуговых преград. Пористость φ принималась из ряда числовых значений 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8. Случай с нулевой пористостью соответствовал сплошной преграде. В расчетах использовался закон сопротивления пористого тела в виде $\Delta p / \Delta x = C_0 V^2$ (Δp — перепад давления на отрезке Δx ; V — скорость смеси).

Для вычисления коэффициента C_0 принято, что гидравлическое сопротивление преграды $\zeta = \Delta p / (\rho V^2 / 2)$ есть функция ее пористости φ : $\zeta = [0.707(1 - \varphi)^{0.375} + 1 - \varphi]^2 \cdot 1 / \varphi^2$, что соответствует данным [5] для перфорированных листов. Такое приближение можно считать допустимым, учитывая двухмерность расчета и использование интегральных характеристик среды.

Перед началом расчета задавался перепад давления на левой границе расчетной области, равный 0.6 МПа, в области заслона давление составляло 0.1 МПа. Давление за фронтом ударной волны в начальный момент времени составляло $P = 0.7$ МПа. Сформировавшаяся ударная волна двигалась слева направо в направлении первой преграды, также, как и в случае с плоскими преградами [4], далее происходило отражение ударно-волнового фронта от первой и последующих преград. Через проницаемые преграды ударная волна проходила с определенным замедлением согласно закону сопротивления среды для данной пористости (рис. 2а). Наклонная или дуговая фронтальная стенка преграды приводили к отражению ударной волны в сторону правого борта выработки. Вдоль правого борта впоследствии образовывалась конфигурация ударных волн, характерная для маховского отражения (рис. 2б). Отраженная от правого борта выработки ударная волна двигалась в направлении внутреннего угла, образованного левым бортом выработки и преградой, где происходило резкое повторное увеличение давления. В случае с наклонной и дуговой преградой первый и второй пики давления меньше аналогичного для плоской преграды.

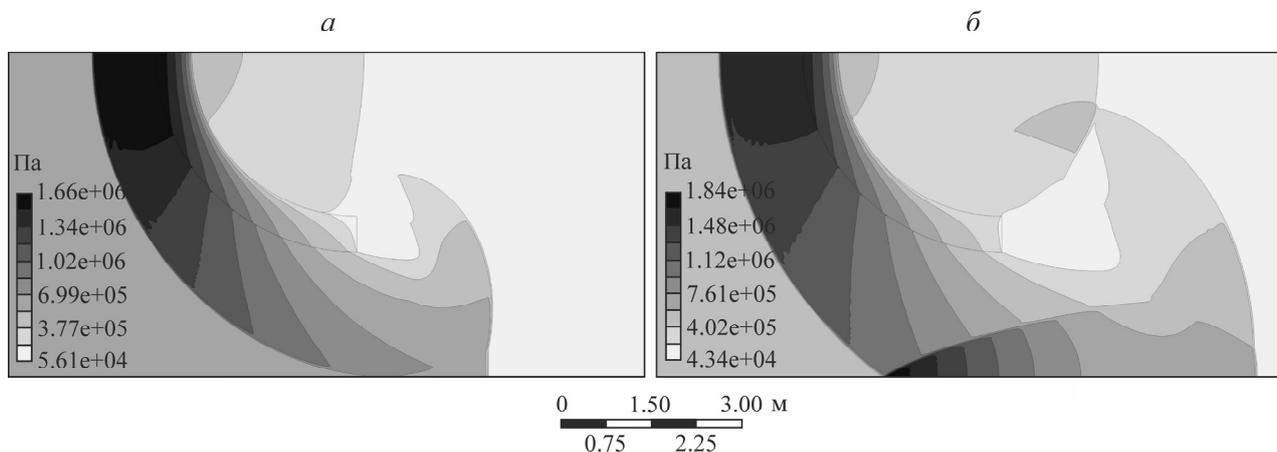


Рис. 2. Поле давлений. Перемещающаяся в обратном направлении область аномального давления вдоль правого борта выработки вблизи первой дуговой преграды. Время с начала проведения расчета: а — 49 мс; б — 52 мс

Расчеты показали, что в точке 1 на фронтальной поверхности первой преграды, расположенной по оси симметрии выработки, для пористости 0.4 наименьшую нагрузку испытывает дуговая преграда (рис. 3). Для нее выполнены расчеты для разных значений пористости (рис. 4).

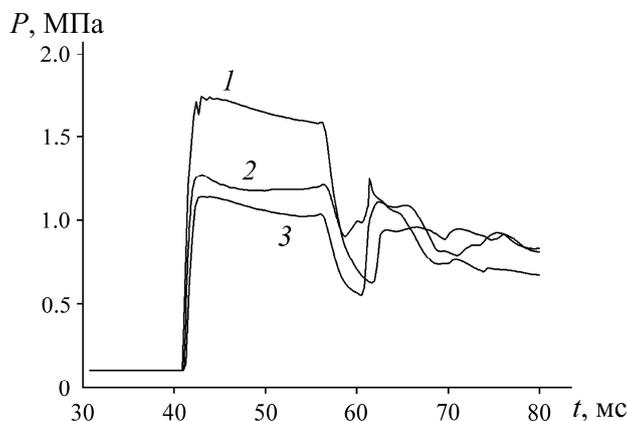


Рис. 3. Зависимость давления от времени в точке 1 первой преграды для разных геометрий преграды: 1 — плоская; 2 — наклонная; 3 — дуговая

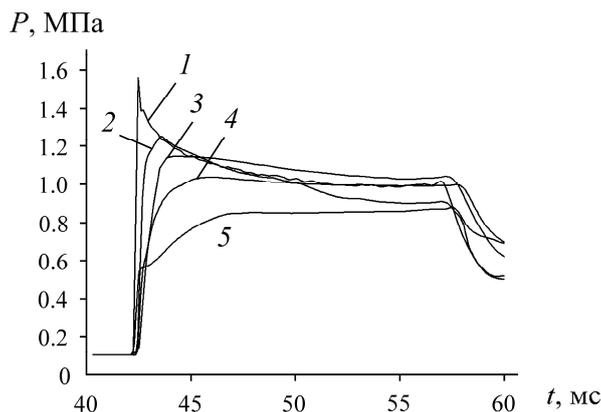


Рис. 4. Зависимость давления в точке 1 первой дуговой преграды для разных значений пористости: 1 — 0; 2 — 0.2; 3 — 0.4; 4 — 0.6; 5 — 0.8

С увеличением пористости интенсивность нагружения преграды снижается приблизительно в 2 раза. Для пористости 0.8 давление составило 0.85 МПа против 1.56 МПа для плоской преграды.

Ослабление заслоном ударно-волнового фронта снижалось с увеличением пористости выше 0.5. На рис. 5 приведены значения давления за фронтом ударной волны для точек, равномерно расположенных на оси симметрии выработки между тыльным торцом четвертой преграды и концом расчетной области (рис. 1). На расстоянии 0.125 за четвертой преградой давление ниже, чем в остальных точках, что объясняется расположением данной области в “тени” преграды, где давление поднимается за счет сложной интерференции ударных волн, отраженных от бортов выработки. В точке, удаленной на 0.500 от четвертой преграды, наблюдался локальный максимум давления для пористости 0.6, что связано с особенностью ударно-волновой картины течения именно для данного значения пористости. В этом случае в рассматриваемой точке сходятся отраженные волны от бортов выработки и проходящая насквозь преграду ударная волна, что обуславливает местное повышение давления.

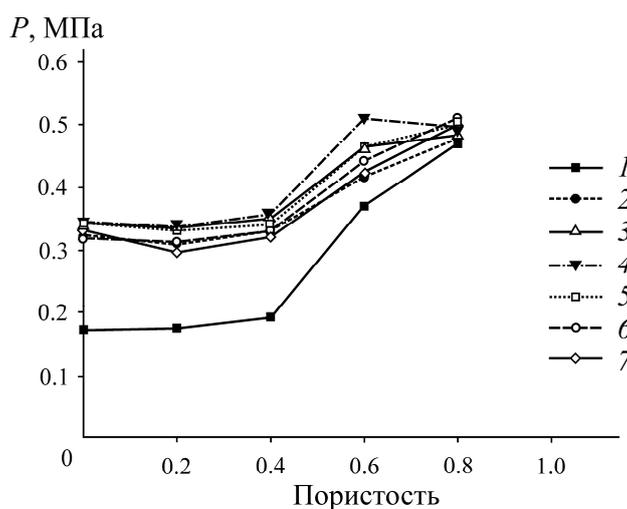


Рис. 5. Зависимость максимального давления на оси симметрии выработки за заслоном от пористости для разных расстояний за четвертой преградой: 1 — 0.125; 2 — 0.250; 3 — 0.375; 4 — 0.500; 5 — 0.625; 6 — 0.750; 7 — 0.875

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты показали, что изменением геометрии газопроницаемых преград заслона возможно добиться снижения ударно-волновой нагрузки на элементы конструкции. Из рассмотренных конфигураций преград (плоская, наклонная, дуговая) меньшую нагрузку вблизи оси симметрии канала испытывает преграда, выполненная в форме дуги. Увеличением пористости преграды можно получить дальнейшее снижение нагрузки на первую и последующие преграды заслона. В то же время при увеличении пористости преград выше 0.5 существенно снижается эффективность работы заслона в целом, как средства снижения интенсивности ударных волн от взрыва.

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. Шалаев В. С., Шалаев Ю. В., Флоря Н. Ф.** Взрывозащита горных выработок угольных шахт. Концепция // Уголь. — 2014. — № 9. — С. 82–85.
- 3. 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.
- 4. Фомин В. М., Постников Б. В., Колотилов В. А., Шалаев В. С., Шалаев Ю. В., Флоря Н. Ф.** Моделирование ударно-волновых процессов в выработке с проницаемыми преградами // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 22–28.
- 5. Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступила в редакцию 11/III 2020

После доработки 15/III 2020

Принята к публикации 11/IX 2020