

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02 : 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПАЧКИ ВЫБРОСООПАСНОГО УГЛЯ

В. Н. Одинцев, И. Е. Шиповский

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
E-mail: Odin-VN@yandex.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрен механизм подготовки газодинамического разрушения пачки выбросоопасного угля при взрывном воздействии на угольный пласт. Изучены условия образования трещин в дальней от взрывной скважины зоне, моделирование наполнения наведенных трещин метаном, который изначально находился в угле в растворенном состоянии, и оценка времени начала развития таких трещин за счет давления свободного метана. Установлено, что в зависимости от механических и диффузионных параметров угля время старта развития трещин может варьировать от десятков секунд до многих часов. Результаты исследования будут полезны при разработке теории взрывного воздействия на угольный пласт в комплексе мер снижения опасности внезапных выбросов угля и газа.

Перемятый уголь, выбросы угля и газа, взрывное воздействие, метанонасыщенный пласт, предразрушение, компьютерное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20190406

Внезапный выброс угля и газа — одно из наиболее катастрофических газодинамических явлений в угольных шахтах. Несмотря на прогресс в решении проблемы предотвращения выбросов, эта задача до сих пор остается актуальной и является основанием для продолжения фундаментальных и прикладных исследований, направленных на разработку мер снижения выбросоопасности угольных пластов. Особое место занимают вопросы снижения выбросоопасности путем создания специальных условий взрывного воздействия на угольный пласт при отсутствии людей в опасной зоне. В этих условиях допускаются выбросы угля и газа, но снимается элемент внезапности. Комплекс мероприятий, обеспечивающих такие условия, известен как режим сотрясательного взрывания. Данный режим вводится перед разработкой наиболее опасных участков, в частности при вскрытии угольного пласта или при разработке пачек перемятого угля — сильно нарушенного, перетертого и сжатого угля вблизи геологических нарушений. Сотрясательное взрывание, с одной стороны, может спровоцировать газодинамическое разрушение части угольного пласта в виде локального выброса угля и газа, с другой — создать условия для спокойной дегазации угольного

пласта и последующего снижения вероятности выброса [1]. Неоднозначное влияние взрывного воздействия на метанонасыщенный угольный пласт не получило пока теоретического объяснения, хотя предпринимаются разноплановые исследования [2–6].

Цель настоящей работы — изучение воздействия взрывной волны на наиболее выбросоопасный (перемятый) уголь для объяснения разной реакции пласта на взрывное воздействие и выявления возможного параметра управления этой реакцией.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Метан в газоносном угольном пласте находится преимущественно в растворенном состоянии или в иной интерпретации в состоянии твердого раствора [7, 8]. Традиционно полагают, что растворенный метан не участвует в динамическом разрушении угля вследствие большого времени перехода его в свободное состояние, а служит пассивным фактором, который учитывается только в итоговых оценках объема выделившегося в шахте метана.

Новой идеей, положенной в основу наших исследований, является концепция активного участия растворенного метана в предразрушении и разрушении угля. Эта идея использовалась нами в модели развития трещин в газоносном угле [9]. Здесь она развивается в отношении подготовки к разрушению перемятого угля при взрывном воздействии.

Перемятый уголь несет следы сильных тектонических воздействий на пласт в ходе его геологической истории. Этот уголь характерен для областей пликативных и дизъюнктивных геологических нарушений угольного пласта, в которых особенно часто происходят опасные газодинамические явления [10]. Характерная особенность данного угля состоит в том, что в нетронутом виде он фактически непроницаем для фильтрации газа. Массоперенос осуществляется по механизму диффузии.

На рис. 1 показана структура выбросоопасного перемятого угля в разных масштабах. Образцы угля из шахты Первомайская (Кузбасс) исследовались методом электронной микроскопии [11]. В масштабе от миллиметра до 100 мкм перемятый уголь представляет собой аморфную однородную массу. В масштабе микрона “зерна” угля напоминают семечки тыквы, поперечный размер которых примерно в 5–10 раз меньше максимального продольного размера. Продольный размер микрофрагментов угля соответствует микрону, а поперечный примерно 0.2 мкм.

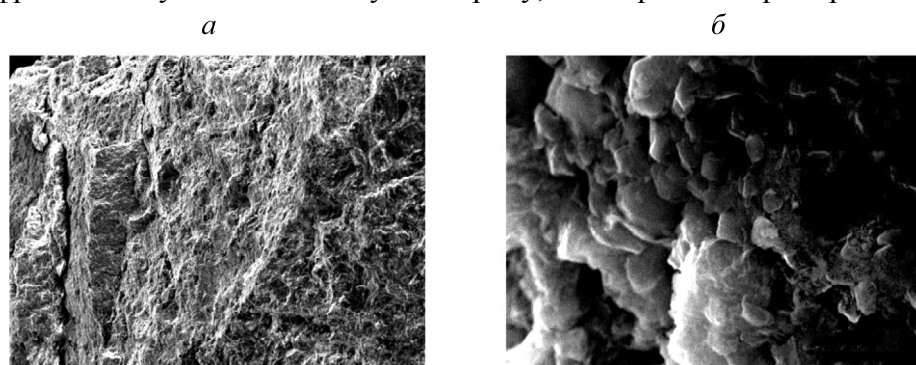


Рис. 1. Изображения выбросоопасного перемятого угля при разных масштабах: *а* — 500 мкм; *б* — 2 мкм

Для понимания особенностей взрывного воздействия на выбросоопасный уголь необходимо учесть результаты экспериментов по изменению состояния пород при взрывном воздействии в дальней от взрыва зоне [12, 13]. Экспериментально установлено, что взрывная волна изменяет природную нарушенность пород на достаточно большом расстоянии от центра взры-

ва. В зоне, удаленной от центра взрывной полости на расстояние свыше 20 радиусов заряда и простирающейся на расстояние до 100 радиусов заряда, наведенная пористость может возрастать на несколько процентов. Эту зону трактуют как зону взрывного предразрушения пород.

В массиве скальных пород зона взрывного предразрушения не оказывает заметного влияния на равновесное состояние пород, однако в метанонасыщенном угле увеличение пористости может резко изменить природное равновесие системы “угольное вещество – растворенный метан”. На берегах наведенных микротрещин метан переходит из растворенного состояния в свободное. Аналогичный эффект наблюдается при вибросейсмическом способе воздействия на уголь, используемом для интенсификации процесса дегазации угольных пластов [14].

Для теоретического исследования закономерностей образования наведенных трещин и заполнения их свободным метаном проведено математическое моделирование соответствующих геопроцессов — распространения взрывной волны, порождаемой различными зарядами взрывчатых веществ, и наполнения наведенных взрывной волной трещин за счет диффузии растворенного метана.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ

Рассматривались условия формирования во взрывной волне напряжений растяжения, определяющие раскрытие природных и наведенных дефектов в удаленной от взрыва зоне. Взрывная волна при шахтных взрывах не является ударной, поэтому при моделировании рассматривалась волна напряжений в сплошной однородной упругой среде. Волна обусловлена резким ростом давления газообразных продуктов взрыва во взрывной камере, скважине, шпуре.

Исследования, начатые аналитически для сферической взрывной камеры и описанные в [13], продолжены численно с помощью компьютерного моделирования динамических процессов, основанного на комбинации метода конечных элементов (FEM) и метода сглаженных частиц (SPH) [15]. Такой подход позволил для условий сферической и цилиндрической симметрии более адекватно учесть детонацию ВВ и конструктивные особенности используемых на практике зарядов.

Бессеточная основа лагранжевого метода SPH исключает вычислительные ограничения на значительные деформации среды, которые естественно возникают при детонации ВВ и разлете продуктов детонации. Неоднократно проводившиеся сопоставления результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными и с расчетами, проведенными другими методами [16], показали, что применяемый вычислительный подход позволяет достаточно точно исследовать взрывное деформирование и разрушение геосреды и получать приемлемые результаты. Разброс значений напряжений не превышал 10 %.

В проведенных расчетах получены картины динамических напряжений во взрывных скважинах (шпурах) и в твердой среде, при этом главное внимание уделялось анализу импульса растяжения во взрывной волне в дальней от взрыва области, т. е. в области, удаленной от центра взрывной скважины на расстояние более двадцати ее радиусов.

Известно, что при камуфлетных взрывах сферических и цилиндрических зарядов в безграничной среде на фронте волны радиальное и окружное напряжения сначала являются сжимающими (здесь отрицательными), но затем становятся растягивающими (положительными). На рис. 2 показаны изменения со временем напряжений σ , порожденных волной при взрыве заряда TNT со скоростью детонации 6930 м/с в шпуре с радиусом $r = 2$ см. По оси ординат отложены напряжения, отнесенные к максимальной величине напряжений сжатия в шпуре $Q^* = 9.7915$ ГПа, по оси абсцисс — время τ от момента прихода взрывной волны в рассматриваемую точку.

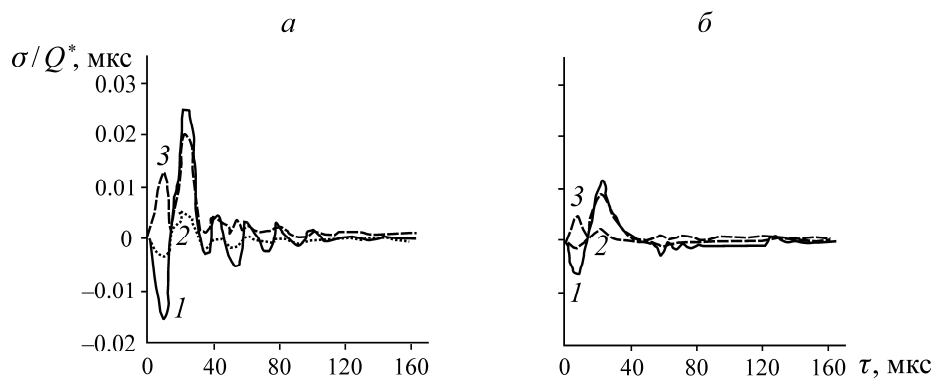


Рис. 2. Изменение безразмерных радиальных (1), окружных (2) напряжений и напряжения Мизеса (3) во времени τ на фронте взрывной волны на расстояниях от центра взрывного шнура: а — $20r$; б — $50r$

Наибольшую величину на фронте волны имеет растягивающее радиальное напряжение, в абсолютных единицах оно может составлять 300 МПа. Продолжительность импульса растяжения превышает 20 мкс, причем в точке на расстоянии $50r$ импульс растяжения является более продолжительным (около 30 мкс), хотя растягивающие напряжения там меньше в 2 раза.

Поскольку растягивающие напряжения и продолжительность действия импульса растяжения зависят от скорости детонации ВВ, в расчетах получены соответствующие зависимости для точек, находящихся на различном удалении от центра шнура (рис. 3). Видно, что при скорости детонации v , превышающей 4 км/с, растягивающие напряжения и их продолжительность на фронте волны достаточны для раскрытия природных и образования наведенных микротрещин [13]. При скорости детонации менее указанной импульс растяжения становится незначительным.

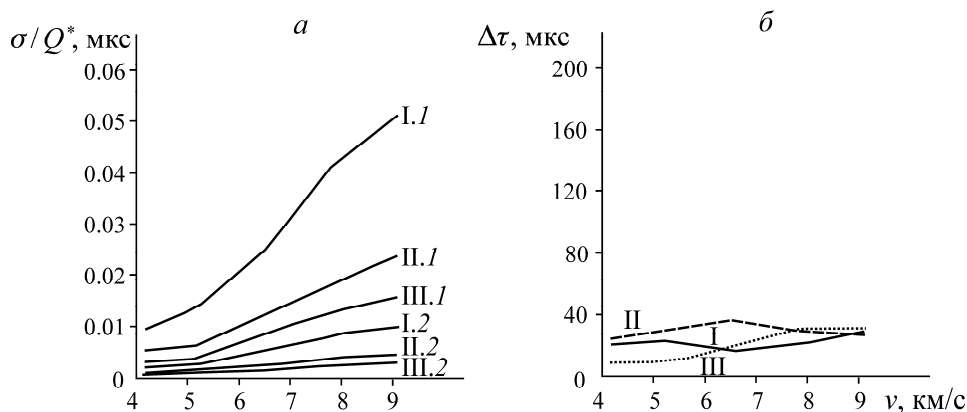


Рис. 3. Зависимости параметров импульса растяжения на фронте волны от скорости детонации v в точках, на расстоянии: $20r$ (I), $50r$ (II), $75r$ (III): а — зависимость максимальных значений радиальных (1) и окружных (2) растягивающих напряжений; б — зависимость протяженности промежутка времени действия импульса растягивающих напряжений $\Delta\tau$

С целью оценки влияния конструктивных особенностей зарядов во взрывной скважине выполнены расчеты влияния кольцевого зазора между оболочечным взрывным устройством и стенкой скважины на величину импульса растяжения. Зазоры между оболочечным взрывным устройством и стенкой скважины предусмотрены при торпедировании угольных пластов. Иногда свободное пространство в скважине заполняют инертным материалом, например водой. Подобные исследования влияния конструктивных особенностей зарядов проводились в [17].

На рис. 4 показано изменение напряжений в точке, удаленной от центра взрывной скважины на расстоянии $20r$, по приходу фронта взрывной волны для различных воздушных зазоров Δs , на рис. 5 — зависимости максимальных радиальных напряжений для разных заполнителей кольцевого зазора.

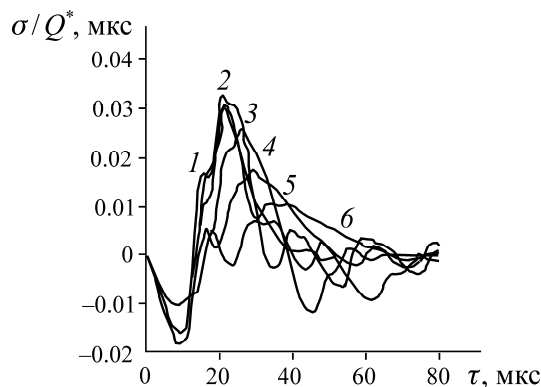


Рис. 4. Изменение радиальных напряжений в зависимости от времени, прошедшего от момента прихода взрывной волны в точку на расстоянии $20r$ для различных значений воздушного зазора Δs : 1 — 0; 2 — 0.25; 3 — 0.50; 4 — 1.00; 5 — 1.75; 6 — 3.00 см

Установлено, что при использовании ВВ, имеющих скорость детонации более 4 км/с, продолжительность импульса растяжения превышает 15 мкс, а величина импульса достигает 300 МПа. Учитывая, что инерционное время динамического разрушения многих материалов порядка 10 мкс, при взрывном воздействии на угольный пласт с использованием детонационных ВВ в пачках нарушенного угля возможно раскрытие природных и образование новых микродефектов. Технологический зазор между стенкой скважины и зарядом при использовании детонационных ВВ не препятствует образованию импульса растяжения во взрывной волне, причем водный заполнитель усиливает амплитуду растягивающих напряжений.

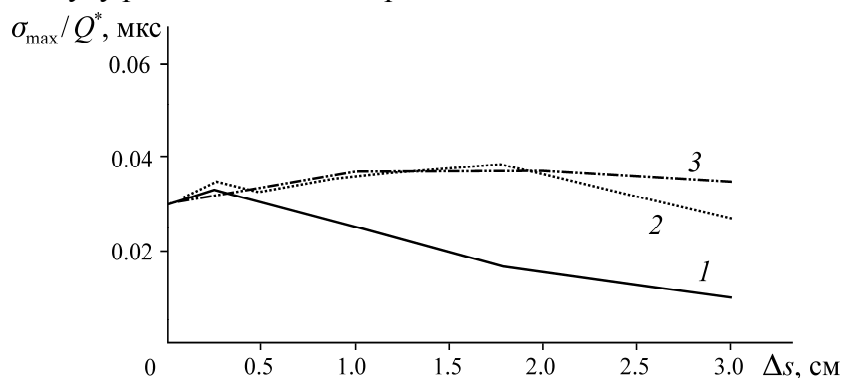


Рис. 5. Безразмерные значения максимальных растягивающих радиальных напряжений в точке на расстоянии $20r$ от стенки взрывной скважины в зависимости от величины зазора Δs и наполненности его инертным материалом: 1 — воздушный зазор; 2 — зазор, заполненный песком; 3 — зазор, заполненный водой

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНАПОЛНЯЕМОЙ ТРЕЩИНЫ

Второе направление исследований связано с оценкой состояния образовавшихся трещин после прохождения взрывной волны. На берегах трещины метан из растворенного состояния переходит в свободное. Наполнение трещины свободным метаном и переход трещины из устойчивого равновесного состояния в неустойчивое является необходимым условием газодинамического разрушения угольного пласта в макромасштабе.

Подход к оценке условий макроразрушения угля, основанный на анализе состояния газонаполненных трещин, использовался различными авторами при изучении механизма выбросов угля и газа. Рассматривались как природные трещины, изначально наполненные свободным метаном, количество которого при развитии трещины не изменяется, так и трещины, количество метана в которых растет с ростом трещины либо за счет растворенного метана, либо за счет метана, образующегося при распаде газогидратов [9, 18].

В настоящей работе изучался диффузионный механизм выхода метана из угольного вещества. Основная часть молекул метана не связана жестко с молекулами угольного вещества и может диффундировать в нем подобно тому, как молекулы метана двигаются в воде. Эти молекулы способны к относительно быстрому выходу из угольного вещества и составляют основную часть свободного метана, образующегося при выбросах угля и газа в подземных выработках. Различные модели газодинамических процессов в угле с учетом диффузии метана представлены в [19–22]. Новизна исследований заключается в моделировании диффузии в замкнутую трещину с оценкой условия развития трещины.

Величину растворенного метана, способного быстро выйти из угля, можно оценить по количеству выделяющегося метана M_T из тонны угля при выбросах в условиях атмосферного давления $P = 0.1$ МПа и температуры $T = 20$ С. Однако в формулах используется безразмерная величина $M_V = M_T d / v_0$, характеризующая выделение метана из кубометра угля ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Здесь d — плотность угля, v_0 — объем, равный кубометру. Таким образом, M_V — природная концентрация растворенного в угле метана.

Среда считается однородной и изотропной в отношении деформации среды и миграции метана. Процесс выхода растворенного метана в трещину описывается системой уравнений, которые отражают разные физические составляющие процесса. Ради упрощения анализа будем полагать, что под воздействием импульса растяжения в среде мгновенно образуется дисковидная трещина отрыва радиусом l с усредненным раскрытием h , причем $l \gg h$. В результате диффузии в трещину молекул метана она заполняется свободным метаном, давление которого обозначим p . Уравнение состояния свободного метана в трещине представим уравнением состояния идеального газа

$$p(t)V = n(t)RT, \quad (1)$$

где $n(t)$ — суммарное число молей растворенного метана, вышедшего в трещину за время t с момента образования трещины; $V = \pi l^2 h$ — объем трещины, R — газовая постоянная.

Диффузия рассматривается как изменение концентрации молекул метана в среде, вызванное образованием трещины. Концентрация c характеризуется отношением текущего значения молей метана N в единице объема твердой среды к начальному значению количества молей растворенного метана в объеме N_0 , т. е. $c = N / N_0$. Нетрудно заключить, что $N_0 = M_V P / RT$. Уравнение диффузии представляется вторым законом Фика $\partial c / \partial t = D \nabla^2 c$, где ∇^2 — оператор Лапласа, D — коэффициент твердотельной диффузии метана в угле.

Выход молекул растворенного метана в трещину сопровождается процессом оседания части молекул на новообразованных берегах трещины по механизму адсорбции. Для простоты этот процесс описывается соотношением Ленгмюра $\theta = \lambda_p / (1 + \lambda_p)$, где $\theta = S / S_l$ — доля площади поверхности берега трещины, занятая адсорбированными молекулами метана в один слой по отношению ко всей площади берега $S_l = \pi l^2$; λ — адсорбционный коэффициент Ленгмюра. Параметр θ характеризует степень “закрытости” поверхности берега трещины из-за адсорбции на нем части молекул.

Максимально возможная величина параметра θ ограничена предельным значением природной концентрации молекул метана θ_0 в слое толщиной в молекулу метана и площадью, равной площади берега трещины. Значение θ_0 можно приближенно оценить по формуле $\theta_0 \sim N_0 N_A d_M^3$, где N_A — число Авогадро, d_M — диаметр молекулы метана.

При значениях природной концентрации метана в угле менее $50 \text{ м}^3/\text{т}$ угля величина θ_0 не превышает 0.1. В этом случае уравнение Ленгмюра представим как $\theta = \lambda p$, которое отвечает закону Генри для растворов. Относительная концентрация молекул метана на берегу трещины записывается выражением $c = \theta / \theta_0$.

Уравнением, определяющим способность трещины к развитию, является соотношение Гриффитса–Ирвина. Поскольку моделируется состояние наведенных трещин вблизи выработок, где минимальное напряжение сжатия в угле мало, уравнение предельного равновесия для дисковидной трещины примет вид

$$2p \left(\frac{l}{\pi} \right)^{1/2} = K_{IC}, \quad (2)$$

где K_{IC} — трещиностойкость материала.

Общая схема расчета диффузии метана в трещину заключается в следующем. Находится изменение во времени мольной концентрации метана в твердой среде после образования трещины и с помощью интегрирования рассчитывается количество молей метана, вышедшего в трещину. По уравнению (1) определяется давление свободного газа в трещине.

Задача решается малыми по времени шагами. Начальные условия для диффузии — момент образования трещины. В момент времени $t = 0$ в свободное пространство трещины с ее берегов мгновенно (без диффузии) “выходят” только те молекулы метана, которые находились в слое толщиной в диаметр молекулы в месте будущего берега трещины. Зная исходную концентрацию молекул растворенного метана в среде, нетрудно оценить количество молекул, ставших мгновенно свободными, и вычислить соответствующее давление свободного газа в трещине по формуле $p_0 = PM_V d_M / h$. Оценка показывает, что при содержании метана в нетронутым угле порядка $5 \text{ м}^3/\text{т}$ и плотности угля $1.5 \text{ т}/\text{м}^3$ начальное давление свободного газа составляет около 10^{-4} МПа.

Для расчетов первого шага принимается, что относительная концентрация молекул метана на берегу трещины равна нулю $c_0 = 0$, на удалении от трещины $c_\infty = 1$. Определяется количество метана, вышедшего в трещину в результате диффузии, и суммарное давление свободного метана в трещине p_1 . По этому значению по приведенным выше соотношениям находится концентрация адсорбированного метана c_1 на берегах трещины после первого шага.

На втором шаге рассчитывается количество метана, поступающего в трещину вследствие продолжающейся диффузии метана с учетом того, что концентрация молекул на берегах трещины имеет значение c_1 . В результате находится суммарное значение давления свободного метана в трещине p_2 после второго шага и значение концентрации молекул метана на берегах трещины c_2 для третьего расчетного шага. Таким образом, на каждом расчетном шаге по времени определяются диффузионный поток молекул метана в трещину с учетом изменения значения концентрации молекул на берегах трещины и суммарное давление свободного метана.

Из расчетов следует, что давление газа в трещине растет со временем, одновременно растет концентрация адсорбированных молекул на берегах трещины. Увеличение адсорбции молекул на берегах трещины тормозит выход в нее молекул растворенного метана и замедляет рост давления газа в трещине. Этот нелинейный процесс наполнения трещины свободным метаном ведет либо к выполнению условия (2), которое означает начало развития трещины, либо к остановке процесса диффузии из-за выполнения на i -м расчетном шаге условия $c_i = 1$, означающего прекращение диффузии молекул метана в трещину.

Расчеты проводились при двух значениях коэффициента диффузии $D = 10^{-13}$, $D = 10^{-14}$ м²/с, которые соответствуют установленному экспериментально интервалу значений коэффициента диффузии для каменных углей $10^{-12} - 10^{-15}$ м²/с [23]. Значения коэффициента Ленгмюра соответствовали диапазону от 0 до 0.005 МПа⁻¹, значения трещиностойкости K_{1C} — диапазону от 0 до 0.1 МПа·м^{1/2}. Содержание метана в угле рассматривалось от 5 до 20 м³/т угля при его плотности 1.5 т/м³.

На рис. 6 приведены графики нарастания давления газа в трещине радиусом 50 мкм с усредненным раскрытием 5 мкм. Кривые 1.0, 1.1, 1.2 и 2.0, 2.1, 2.2 относятся к расчетам с коэффициентом диффузии $D = 10^{-13}$ м²/с, кривые 3.0, 3.1, 3.2 и 4.0, 4.1, 4.2 — с $D = 10^{-14}$ м²/с. Кривые 1.0, 1.1, 1.2 и 3.0, 3.1, 3.2 соответствуют исходному содержанию метана в угле 5 м³/т, кривые 2.0, 2.1, 2.2 и 4.0, 4.1, 4.2 — содержанию метана 20 м³/т. Штриховые кривые 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 соответствуют значению адсорбционного коэффициента Ленгмюра $\lambda = 0$, кривые 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 — случаю $\lambda = 0.001$ МПа⁻¹, кривые 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 — случаю $\lambda = 0.005$ МПа⁻¹. Наличие конечных точек на кривых 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 указывает на остановку процесса диффузии в связи с достижением на берегах трещины значения концентрации метана, равного исходному значению θ_0 .

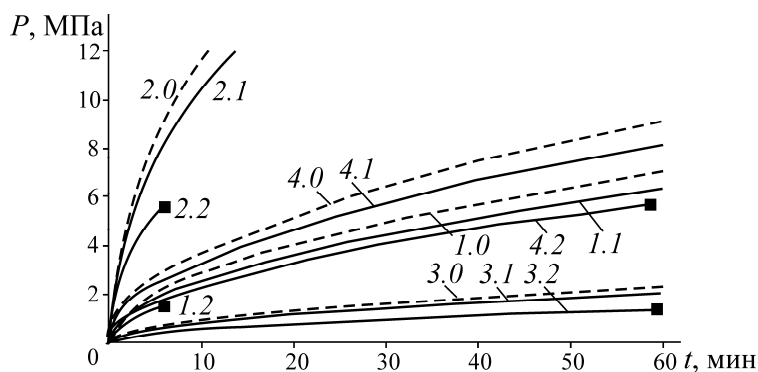


Рис. 6. Кривые роста давления свободного метана в трещине во времени при различных параметрах диффузии, адсорбции и содержания метана в среде

На рис. 7 показаны зависимости характерного времени t^* достижения критического давления газа в трещине (в безразмерном виде $t^* = t/t_1$, где $t_1 = 1$ мин) и начала ее развития от трещиностойкости K_{1C} и размера трещины l . Кривые 1, 2 получены при коэффициенте диффузии $D = 10^{-13}$ м²/с, кривые 3, 4 — при $D = 10^{-14}$ м²/с. Кривые 1, 3 соответствуют случаю начальной газоносности угля 20 м³ на 1 т, кривые 2 и 4 — 5 м³/т.

Характерное время старта развития трещины t^* после прохождения взрывной волны варьирует от десятков секунд до многих часов в зависимости от трещиностойкости угля, коэффициента диффузии метана и концентрации в угле растворенного метана.

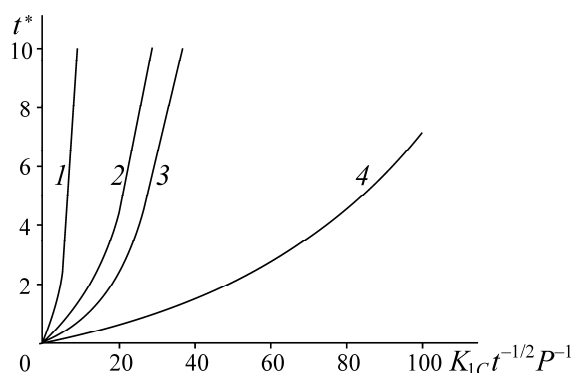


Рис. 7. Зависимости характерного времени t^* начала развития трещин от значения трещиностойкости угля K_{1C} и размера образовавшихся трещин l

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделировалось воздействие взрывной волны на сплошную среду, представляющую перемятый уголь. Оценивалась возможность образования несвязанных между собой трещин вследствие высоких напряжений растяжения во взрывной волне. Показано, что определяющим фактором образования трещин является скорость детонации взрывчатого вещества. Если она превышает 4 км/с, то во взрывной волне даже на больших расстояниях от заряда (до 100 радиусов заряда) напряжения растяжения достаточны для образования трещин отрыва в пачках перемятого угля. Время действия импульса растяжения превышает время инерции раскрытия и начала развития природных дефектов. Эти выводы справедливы для взрывания зарядов в шпурах и скважинах, причем для зарядов как с отсутствием, так и с наличием кольцевых зазоров между зарядом и стенкой скважины и при различных заполнителях зазоров.

При скорости детонации менее 4 км/с развитие наведенных трещин в дальней от взрыва зоне невозможно. В этом случае образуются отдельные протяженные радиальные трещины, развивающиеся от взрывной скважины вглубь массива за счет газообразных продуктов взрыва. Таким образом, применение ВВ с различной скоростью детонации может быть достаточно эффективным способом управления состоянием угольного пласта по фактору его трещинообразования.

Во второй части работы моделировалось заполнение наведенных трещин растворенным в угле метаном. Установлено, что скорость заполнения трещин метаном сильно зависит от коэффициента диффузии метана в угле. Сделан вывод о том, что на процесс заполнения трещин влияет адсорбция части молекул, выходящих в трещину. Она замедляет и даже блокирует заполнение трещин метаном. Таким образом, возникновение наведенных открытых трещин необходимое, но недостаточное условие для газодинамического разрушения угля после взрывного воздействия, поскольку значение имеют особенности заполнения трещин метаном.

Определение коэффициента диффузии угля в природных условиях — трудная задача. Полученные в экспериментах значения существенно различаются, поэтому их использование в теоретических оценках может приводить к неадекватным результатам. Так, различие в коэффициенте диффузии фактически предопределяет качественное различие в реакции угля на взрывное воздействие — от очень быстрой (десятки секунд) до замедленной (часы). Необходимо развивать оценки коэффициента диффузии на основе решения обратных задач [24].

Другим физико-химическим параметром, влияющим на переход метана из растворенного состояния в свободное, является адсорбционный коэффициент Ленгмюра. Из-за отсутствия достоверных данных о значениях этого коэффициента для выбросоопасных углей моделирование проведено при его значениях, различающихся на порядки. Если исходить из значений этого коэффициента меньше 10^{-7} МПа⁻¹, установленных для древесного угля и углеводородов, то можно сделать вывод, что адсорбция в реальных условиях приводит к замедлению времени старта развития наведенной трещины лишь на несколько минут. При более высоких значениях $\lambda > 0.004$ МПа⁻¹ адсорбция молекул на берегах наведенной трещины может вызвать остановку процесса диффузии молекул в трещину.

Исследования подтверждают, что газоносность угля — один из главных параметров, определяющих возможность его газодинамического разрушения. При газоносности угля в несколько десятков кубометров метана на тонну газодинамическое разрушение перемятого угля может начаться спустя 10 мин после взрывного воздействия даже при относительно малых значениях коэффициента диффузии метана $D = 10^{-15}$ м²/с.

Прочностным параметром, характеризующим способность угля к газодинамическому разрушению, является трещиностойкость. Чтобы выявить склонность к выбросам перемятого угля, необходимо использовать минимальные значения порядка 0.025 МПа·м^{1/2}. Для оценки начала газодинамического разрушения угля имеет значение также раскрытие наведенных трещин, которое определяет частоту столкновения молекул метана в трещине [7]. При раскрытии трещины свыше 5 мкм свободный метан отвечает состоянию идеального газа и наиболее активно способен поддерживать развитие трещины. Если длина трещины отрыва на порядок превышает ее раскрытие, то выводы в отношении условий развития трещин применимы для наведенных трещин длиной более 100 мкм.

В целом результаты моделирования соответствуют натурным данным. Выбросоопасные пласты при взрывном воздействии имеют разное время начала спровоцированного выброса — в одних случаях это секунды, в других — десятки минут, в третьих — выбросы отсутствуют. Такое различие объясняется локальной вариацией газоносности пласта, диффузионных параметров и трещиностойкости угля.

Обобщенный вывод исследования состоит в констатации возможности образования в угольном пласте скрытых областей наведенной трещиноватости. В этих областях пласт может изменить свое начальное состояние качественно, поскольку наведенные трещины заполняются свободным метаном, способным совершить работу по разрушению угля. Характерный размер этих областей зависит как от размера геологической неоднородности пласта, так и от технологии взрывания. При сотрясательном взрывании пласта системой взрывных шпуров или при торпедировании пласта протяженность области может составлять несколько метров.

Результаты исследования будут полезны при разработке теории взрывного воздействия на угольный пласт в отношении учета скорости детонации ВВ и расположения взрывных скважин и шпуров таким образом, чтобы в зависимости от целей взрывного воздействия происходило или не происходило перекрытие наведенных областей метастабильности угля.

ВЫВОДЫ

Обоснована возможность образования при взрывных воздействиях на угольный пласт областей предразрушения угля, наполняемых свободным метаном. Наведенные в этой области трещины в зависимости от физических и механических свойств угля могут быть либо устой-

чивыми, либо неустойчивыми структурными образованиями. Метастабильная газосодержащая область предразрушения угля по прошествии времени становится очагом выброса угля и газа в горную выработку. Время начала газодинамического разрушения угля после взрывного воздействия варьирует от десятков секунд до часов и даже суток. Определяющими прогнозными параметрами выбросов, спровоцированных взрыванием угольного пласта, являются низкая трещиностойкость и высокая газоносность угля. Этим характеристикам отвечают пачки перемятого угля, которые в наибольшей степени опасны по выбросам угля и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mineev S., Yanzhula O., Hulai O., Minieiev O., and Zabolotnikova V. Application of shock blasting mode in mine roadway construction, *Mining of Mineral Deposits*, 2016, Vol. 10, No. 2. — P. 91–96.
2. Chang W.-B., Fan S.-W., Zhang L., and Shu L.-Y. A model based on explosive stress wave and tectonic coal zone which gestate dangerous state of coal and gas outburst, *J. of the China Coal Society*, 2014, Vol. 39, No. 11. — P. 2226–2231.
3. Fan X.-G., Wang H.-T., Yuan Z.-G., Xu H.-X. The analysis on pre-splitting blasting to improve permeability draining rate in heading excavation, *Chongqing Daxue Xuebao, J. of Chongqing University*, 2010, Vol. 33, No. 9. — P. 69–73.
4. Zhicheng Xie, Dongming Zhang, Zhenlong Song, Minghui Li, Chao Liu, and Dongling Sun. Optimization of drilling layouts based on controlled presplitting blasting through strata for gas drainage in coal roadway strips, *Energies*, 2017, Vol. 10, No. 8. — P. 1–13.
5. Liu J., and Liu Z. G. Study on application of deep borehole pre-fracturing blasting technology to seam opening in mine shaft, *Coal Science and Technology*, 2012, Vol. 40, No. 2. — P. 19–24.
6. Liu J., Liu Z., and Gao K. An experimental study of deep borehole pre-cracking blasting for experimental study of deep borehole pre-cracking blasting for gas pre-drainage on a mine heading roadway in a low permeability seam, *AGH J. of Min. and Geoengineering*, 2012, Vol. 36, No. 3. — P. 225–232.
7. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: Изд-во АГН, 2000. — 519 с.
8. Курленя М. В., Сердюков С. В. Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.
9. Одинцев В. Н. Внезапный выброс угля и газа — разрушение природного угля как раствора метана в твердом веществе // ФТПРПИ. — 1997. — № 6. — С. 18–28.
10. An F. H. and Cheng Y. P. An explanation of large-scale and gas outburst in underground coal mines: the effect of low-permeability zones on abnormally abundant gas, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, Vol. 14. — P. 2125–2132.
11. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Викторов С. Д., Малинникова О. Н., Одинцев В. Н., Кочанов А. Н., Учаев Д. В. Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению // ДАН. — 2010. — Т. 431. — № 6. — С. 818.
12. Verma H. K., Samadhiya N. K., Singh M., and Prasad V. V. R. Blast induced damage to surrounding rock mass in an underground excavation, *J. Geol. Res. and Eng.* — 2014, Vol. 2. — P. 13–18.
13. Кочанов А. Н., Одинцев В. Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 38–48.
14. Клишин В. И., Тациенко А. Л., Опрук Г. Ю. Инновационные методы интенсификации процесса дегазации угольных пластов из подготовительных выработок // Вестн. КузГТУ. — 2017. — № 6 (124). — С. 89–97.

15. Shipovskii I. E. Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code, Scientific Bulletin of National Mining University, 2015, Vol. 145, Issue 1. — P. 76–82.
16. Камянский В. Н. Моделирование взрыва скважинных зарядов в среде ANSYS // Проблемы недропользования. — 2017. — № 1. — С. 120–126.
17. Шер Е. Н., Александрова Н. И. Исследование влияния конструкции скважинного заряда на размер зоны разрушения и время ее развития в горных породах при взрыве // ФТПРПИ. — 2007. — № 4. — С. 77–85.
18. Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Исмагилов З. Р., Ким Т. Л. Влияние разложения газовых гидратов на рост трещин в массиве угля впереди забоя подготовительной выработки // Горн. журн. — 2016. — № 3. — С. 96–103.
19. Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Газодинамика угольного пласта. Ч. 1. Математическое описание кинетики десорбции // ФТПРПИ. — 2009. — № 1. — С. 6–14.
20. Алексеев А. Д., Василенко Т. А., Гуменик К. В., Калугина Н. А., Фельдман Э. П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // ЖТФ. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4. — С. 65–74.
21. Малинникова О. Н., Одинцев В. Н., Трофимов В. А. Оценка условий метаноотдачи угля на микроструктурном уровне // ГИАБ. — 2009. — № 11. — С. 189–204.
22. Pillalamarry M., Harpalani S., and Liu S. Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoir, Int. J. of Coal Geology, 2011, Vol. 86, No. 4. — P. 342–348.
23. Василенко Т. А., Кириллов А. К., Молчанов А. Н., Вишняков А. В., Пономаренко Д. А. Влияние температуры на диффузионные параметры системы “уголь–газ” // Геотехническая механика. — 2012. — Вып. 98. — С. 41–48.
24. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Полевщиков Г. Я., Родин Р. И. Определение коэффициента диффузии и содержания газа в угле на основе решения обратной задачи // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 15–23.

*Поступила в редакцию 18/VI 2019
После доработки 03/VII 2019
Принята к публикации 03/VII 2019*