

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 532.685, 533.15

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ УГЛЯ И ГАЗА В ШАХТАХ

Жоу Айтао¹, Кай Ванг¹, Т. А. Киряева², В. Н. Опарин^{2,3}

¹Школа минеральных ресурсов и техники безопасности,
Государственная главная лаборатория угольной промышленности и безопасности,
Горно-технологический университет Китая, 100083, г. Пекин, Китай

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: coalmetan@mail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, E-mail: oparin@misd.ru,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Рассматривается механизм взаимодействия между пылевидным углем и газовым потоком. Разработан метод численного моделирования для изучения характеристик распространения двухфазного потока с учетом влияния энергии расширяющегося газа на стадии развития внезапного выброса. Метод механико-математического моделирования верифицирован экспериментально с использованием аэродинамической трубы для изучения движения потока пылевидного угля и газа. Сравнение результатов экспериментальных исследований и численного моделирования демонстрирует их удовлетворительную сходимость при описании этого потока во время выброса с формированием ударных волн, затухающих в направлении распространения. При этом объемная доля пылевидного угля в двухфазном потоке является существенным фактором, влияющим на процесс затухания ударной волны внезапного выброса.

Характеристики распространения, пылевидный уголь и газ, двухфазный поток, внезапный выброс угля и газа, ударная волна, механико-математическое и физическое моделирование, сравнение результатов, подъемные выработки

Как известно [1], под “внезапным выбросом” в горном деле понимается “неожиданный, самопроизвольный выброс какого-либо вещества (обычно смеси твердых частиц и газа) из недр Земли в свободное пространство (атмосферу, горную выработку)”. Это динамическое событие нередко наблюдается в шахтах при разработке угольных пластов на глубинах более 300 м, где

С Китайской стороны работа выполнена при финансовой поддержке Государственной главной программы научных исследований Китая (2016YFC0801402, 2016YFC0600708), Национального фонда естественных наук Китая (51474219, 51304213).

С Российской стороны работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282).

газовый компонент из метана и углекислого газа (обычно в сорбированном состоянии) находится под давлением 2–3 МПа и более [2, 3]. Начало выброса обычно характеризуется “самопроизвольным” и практически “мгновенным” разрушением продуктивного пласта под воздействием горного давления в окрестностях подземных выработок, давления газа и пластовых вод в трещинно-поровом пространстве породных массивов. Широко известен и описан в научной литературе [1–3] самый большой внезапный выброс угля и газа, произошедший в Донбассе в 1968 г. на глубине 750 м (14 тыс. т угля и ~ 600 тыс. м³ метана). В 70 % случаев динамические события сопровождаются выбросами угля и пород массой от 5 до 50 т. С ростом глубины разработки газоносных пластов вероятность и мощность их проявлений, как правило, возрастают.

Первые внезапные выбросы угля и газа в странах Западной Европы отмечены еще в XIX в.: во Франции — в 1834 г., в Бельгии — в 1874 г., на Украине — в 1906 г. и т. д. В качестве достаточно эффективных мер профилактики подобного рода динамических событий в практике горного дела применяются взрывное сотрясательное воздействие, гидрорыхление (с отжимом части пласта в выработку), опережающая отработка защитных пластов и др.

В процессе разработки угольных пластов внезапные выбросы угля и газа, как динамические проявления горного давления, могут переносить тысячи тонн пылевидного угля и большие объемы газа в ограниченном объеме подземных выработок за достаточно короткий период времени. При этом двухфазный поток из газа и измельченного угля способен приводить к катастрофическим событиям — гибели горнорабочих и разрушениям дорогостоящей техники и конструктивных элементов “подземного пространства”.

Угольные и газовые выбросы при разработке месторождений каменного угля представляют собой сложные динамические явления [4, 5]. В момент выброса уголь и горная порода вокруг забоя выработки подвергаются скоростному дроблению и выбросу с освобождением большого количества газа из угля, нередко размельченного в порошок. При внезапном выбросе поток пылевидного угля и газа обладает большой кинетической энергией [6], которая может быть причиной фатальных последствий и вывода из строя подземного оборудования. Так, в последние годы в Китае произошло несколько случаев внезапных выбросов угля и газа: например, крупное событие на угольной шахте Дапинг, Zheng Coal Group, в провинции Хенань 20 октября 2004 г. с выбросом 1894 т угля и горной породы и около 250 тыс. м³ газа. Из-за высокого давления газового потока были разрушены системы подземной вентиляции; большой объем газа перенесен в смежные воздухозаборные выработки, где его концентрация превысила критический уровень и привела к взрывам — 148 человек погибли и 32 были ранены.

В России и Китае в последние годы осуществлен большой объем исследований по проблемам внезапных выбросов угля и газа, а также их связи с пожароопасностью [7–11], что привело к разработке соответствующих моделей и теорий. Научно-исследовательские достижения главным образом касаются механизма и прогноза внезапных выбросов, а также способов их предупреждения. Значительно меньший объем исследований посвящен по изучению динамико-кинематических характеристик движения газовых потоков в процессе выброса.

В России методы математического моделирования процессов движения метана в угольных пластах, а также прогнозирования внезапных выбросов угля и газа стали активно разрабатываться с середины прошлого века [12–15]. Это направление исследований получило большое развитие как в феноменологическом, так и теоретическом аспектах [16–24].

Так, в работе [24] в рамках механико-математической модели неравновесной фильтрации газа в угольном пласте, с учетом процессов десорбции, получено решение в виде “бегущей (ударной) волны”, которая с выходом на свободную поверхность угольного массива переходит в волну дробления С. А. Христиановича. Показано, что время релаксации процесса десорбции газа существенно влияет на ширину “ударной волны”, а сам процесс фильтрации и диффузии свободного и сорбированного газа в угольном пласте описывается системами неоднородных параболических уравнений.

Новые возможности для более адекватной характеристики описания массо-газообменных процессов в многофазных геосредах с возможными катастрофическими проявлениями горного давления в подземных выработках дают теоретические обобщения, приведенные в [23]. Здесь для описания взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в многофазных угольных пластах впервые доказываются существование “операторного продолжения”, связывающего уравнение Ленгмюра и кинематическое уравнение В. Н. Опарина для нелинейных упругих волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения [22]. При этом используется недавно экспериментально открытый “поршневой механизм” протекания нелинейных массо-газообменных процессов в геосредах со структурой как органической, так и неорганической природы [7, 26, 27].

В [28] дан теоретический анализ процесса формирования и закона распространения ударной волны выброса. В [25] проведено моделирование ударных волн выброса на основе упрощенной модели инициирования выброса. Полевые исследования давления потока газа выброса выполнены на угольной шахте Жонлианшан, Китай [29]. Экспериментальные результаты давления ударной волны 0.3–0.6 МПа подтверждают развитие ее огромного разрушительного потенциала. В [30–32] представлен анализ характеристик распространения ударной волны выброса в различных шахтных выработках. Следует отметить, что ни один из цитируемых исследователей не рассматривал влияние пылевидного угля на распространение ударных волн выброса. Не вызывает сомнения тот факт, что потоки пылевидного угля и газа взаимодействуют в процессе выброса.

В данной работе комплекс методов теоретического анализа, численного моделирования, а также экспериментальных измерений позволил изучить механизм взаимодействия потоков пылевидного угля и газа, построить 3D эволюционные модели двухфазного потока и исследовать закономерность затухания давления выброса.

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Пылевидный уголь и поток газа, генерируемые в процессе внезапного выброса, характеризуются сложной фазовой структурой. Для анализа потоков “газ–твердое тело” сначала определяют соответствующие модели для каждого состояния, затем выбирают эффективную модель для их объединения [33–37].

Уравнение неразрывности для смеси:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0, \quad (1)$$

где $\vec{v}_m = \left(\sum_{k=1}^N a_k \rho_k \vec{v}_k \right) / \rho_m$ — среднемассовая скорость; $\rho_m = \sum_{k=1}^N a_k \rho_k$ — плотность смеси; a_k — объемная доля фазы k ; N — число фаз.

Уравнение количества движения для смеси можно получить путем суммирования отдельных уравнений количества движения для двух фаз:

$$\frac{\partial(\rho_m \vec{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla[\mu_m(\vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^N a_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right), \quad (2)$$

где p — давление; $\mu_m = \sum_{k=1}^N a_k \mu_k$ — вязкость смеси; $\vec{g} = (0, 0, g)$; g — ускорение свободного падения; $\vec{v}_{dr,k}$ — дрейфовая скорость для вторичной фазы k .

Уравнение сохранения энергии для смеси имеет вид

$$\sum_{k=1}^N [\partial_k \rho_k E_k + \nabla \cdot (\partial_k v_k (\rho_k E_k + p))] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E, \quad (3)$$

здесь T — температура; k_{eff} — эффективная удельная проводимость. Первый член в правой части уравнения (3) представляет перенос энергии за счет проводимости, S_E включает другие объемные источники тепла.

В уравнении (3)

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2},$$

h_k — энтальпия для фазы k .

Дрейфовую скорость (скорость скольжения) определяют как скорость пылевидного угля \vec{v}_p относительно скорости газового потока \vec{v}_q : $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p - \vec{v}_q$. Весовая доля фазы k равна $c_k = (a_k \rho_k) / \rho_m$.

Скорость смещения и относительная скорость \vec{v}_{qp} связаны выражением

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^N c_k \vec{v}_{qk}. \quad (4)$$

В данном исследовании в модели смеси использована алгебраическая формулировка скольжения. Основное предположение модели скольжения смеси — это установление алгебраической зависимости для относительной скорости, а локальное равновесие между фазами должно быть достигнуто через короткий пространственный интервал. Относительная скорость

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{\text{drag}}} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \vec{a}, \quad (5)$$

где $\tau_p = (\rho_p d_p^2) / 18 \mu_q$ — время релаксации; $\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t}$ — ускорение пылевидной частицы угля; d — ее диаметр.

Функция отсутствия тяги:

$$f_{\text{drag}} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}, & \text{Re} \leq 1000; \\ 0.0183 \text{Re}, & \text{Re} > 1000, \end{cases} \quad (6)$$

Re — число Рейнольдса.

Простейшая алгебраическая формулировка скольжения — это так называемая модель смещения потока с гравитационным ускорением частицы.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА

Учитывая сложность и изменчивость внезапного выброса угля и газа, как это следует из (1)–(6), его целесообразно анализировать с энергетических позиций [22]. Известно, что энергия расширения газа в сочетании с энергией упругости угля после переноса пылевидного угля трансформируется в энергию дробления угля, энергию транспортировки и остаточную кинетическую энергию газа [38]. В [29] вычислены значения энергии упругости угля и энергии расширения газа для нескольких случаев внезапного выброса и доказано, что упругая энергия составляет лишь несколько тысячных от суммарной энергии выброса. Таким образом, на стадии развития внезапного выброса упругую энергию угля можно не учитывать, а энергию переноса угля получить за счет энергии расширения газа из уравнения

$$W = \frac{P_0 V_0}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{1 - \frac{1}{\gamma}} - 1 \right], \quad (7)$$

где P_0 , P_1 — соответственно атмосферное давление и давление газа в полости внезапного выброса; γ — адиабатический коэффициент (как правило, $\gamma = 1.3$); V_0 — объем газа при давлении P_0 .

Как следует из уравнения (7), объем газа и давление газа в полости внезапного выброса являются доминирующими в энергии переноса в двухфазном потоке газа и пылевидного угля.

Начальные условия. При численном моделировании характеристик распространения двухфазного потока пылевидного угля и газа необходимо задать начальные значения параметров в диапазоне их моделирования. На рис. 1 показана геометрическая схема забоя в угольной шахте в критический момент развития внезапного выброса.

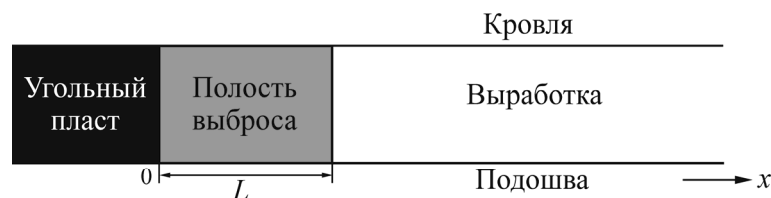


Рис. 1. Модель забоя в момент развития внезапного выброса

Полагаем, что длина полости внезапного выброса L ; газ под высоким давлением находится в стационарном состоянии; относительная концентрация газа $C_1 = 1$ в зоне выброса (предположительно, метан); температура T_1 газа в полости выброса 300 К. На основе результатов анализа энергии двухфазного потока “газ–пылевидный уголь” в критическом состоянии запишем начальное условие газа в полости выброса:

$$P = P_1, \quad u = 0, \quad T = 200 \text{ К}, \quad C = 1 \quad (t = 0, -L < x < 0).$$

Обычно забой пройден на определенной глубине. Существует разница между давлением воздуха в забое и атмосферным давлением на поверхности. Как правило, она достаточно мала, поэтому давление воздуха в забое принимается равным атмосферному давлению P_0 . Скорость потока воздуха не превышает 15 м/с в забое и 8 м/с в вентиляционной выработке для исходящей струи. Скорость потока воздуха существенно ниже скорости распространения газового потока при выбросе, в связи с чем скорость воздушного потока в забое можно принять равной нулю.

Концентрация газа внутри воздушного потока не выше 1 %. Следовательно, можно предположить, что объемная концентрация газа в забое также равна нулю. Температуры в забое и в полости внезапного выброса полагаем равными. Согласно результатам анализа, начальные условия воздушного потока в забое в критическом состоянии имеют вид:

$$P = P_0, \quad u = 0, \quad T = 300 \text{ К}, \quad C = 0 \quad (t = 0, x > 0).$$

Граничные условия. Для численного моделирования граничные условия включают границы входа и выхода потока, пристенную границу, симметричную ей границу и т. д.

На стенках выработки задаются условия сцепления $u = 0$, а также равенство нулю производных по нормали остальных неизвестных функций:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Граничные условия входа потока. В критическом состоянии выходное отверстие заполнено углем и газом. Можно предположить, что входное условие — это большой “контейнер” с известными параметрами “торможения”. Полагая градиент каждой переменной в направлении i равным нулю, получим выражение для каждой переменной:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad v_j = 0 \quad (i \neq j). \quad (9)$$

Выделение газа из пылевидного угля под высоким давлением можно рассматривать как адиабатический процесс согласно энтропийной гипотезе:

$$h_i = h_0, \quad C_p T_i = C_p T_0 + \frac{1}{2} u_i^2. \quad (10)$$

При выведении уравнения состояния идеального газа получаем параметры для других входных границ:

$$\frac{T_i}{T_0} = 1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u_i^2}{C_0}, \quad \frac{\rho_i}{\rho_0} = \left(\frac{T_i}{T_0} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}, \quad \frac{P_i}{P_0} = \left(\frac{T_i}{T_0} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}. \quad (11)$$

Граничные условия выхода потока относятся к параметрам данного потока при особом геометрическом положении выхода, включая скорость, давление и т. д. В данной работе выходная граница установлена достаточно далеко, так что зона исследований не попадает в область влияния граничных условий. Давление на выходной границе равно атмосферному давлению в забое, а градиент других параметров равен нулю. Соответствующая зависимость имеет вид:

$$P = P_0, \quad \frac{\partial u}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial x_i} = 0, \quad (12)$$

где i — положительное направление поверхности выходной границы, перпендикулярное направлению воздушного потока.

В процессе численного моделирования для выходных граничных условий задается статическое давление. Однако его можно применять только для “дозвукового” потока. В случае “сверхзвукового” выходного потока выходная граница должна быть перемещена намного дальше, чтобы избежать ее воздействия.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ T-ОБРАЗНЫХ ВЫРАБОТОК

Для численного моделирования газодинамических процессов разработана соответствующая программа, реализующая (1)–(12). Для иллюстрации эффективности ее работы рассмотрим конкретный пример T-образной выработки.

На рис. 2 показана геометрия T-образной выработки с постоянным поперечным сечением. Высота выработки 2 м, полость от внезапного выброса имеет длину 6 м и высоту до 2 м. Для мониторинга характеристик распространения ударной волны внезапного выброса взяты поперечные сечения *AB* и *EF*. Давление газа в полости выброса равно 1 МПа.

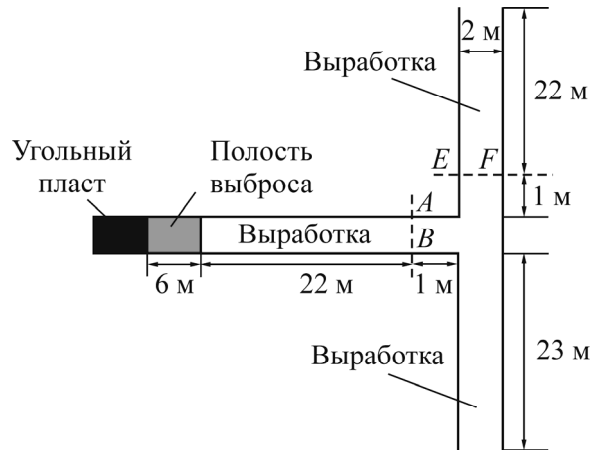


Рис. 2. Геометрия T-образной выработки

Для анализа влияния пылевидного угля на ударную волну выброса выполнено моделирование двух различных условий: выбрасывается только газ, где объемная доля пылевидного угля равна 0%; выбрасывается смесь “угля – газа” при объемной доле пылевидного угля 5%.

На рис. 3 представлены характеристики распространения ударных волн внезапного выброса в забое выработки при различных значениях поперечного сечения. Очевидно, что во время внезапного выброса пылевидный уголь и газ “мгновенно” выталкиваются под высоким давлением из образующейся полости, быстро расширяются, сжимая воздух в выработке и генерируя ударные волны.

Как показано на рис. 3, скорость распространения ударных волн выброса высокая. При 0%-й объемной доле пылевидного угля пиковое “сверхдавление” ударной волны выброса достигает поперечного сечения *AB* за 0.0404 с, при 5%-й объемной доле — за 0.0478 с. Благодаря взаимодействию пылевидного угля и газового потока расходуется часть энергии ударной волны внезапного выброса, что соответственно снижает пиковое сверхдавление. Более того, интенсивность ударных волн выброса ослабевает с расстоянием распространения волны: коэффициент затухания для поперечного сечения в интервале *AB–EF* равен 1.86 при 0%-й объемной доле пылевидного угля и 2.22 — при 5%-й.

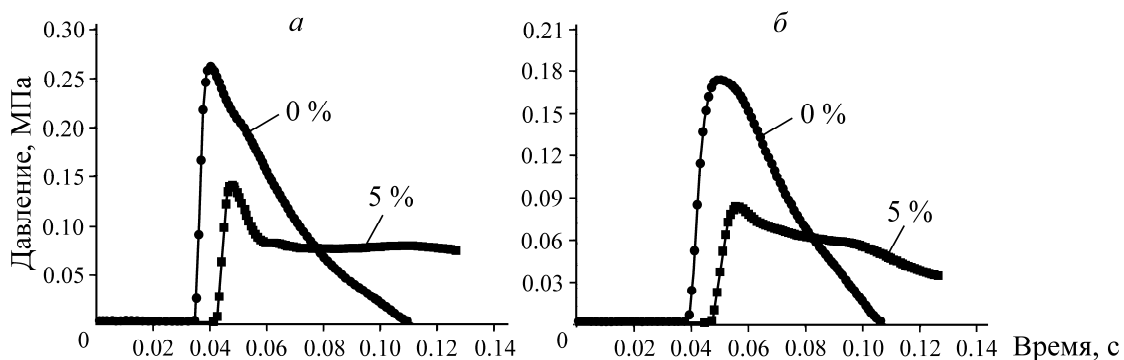


Рис. 3. Профиль изменения давления ударных волн выброса со временем в поперечных сечениях *AB* (а) и *EF* (б)

На рис. 4 представлены характеристики распространения пылевидного угля и газового потока вдоль выработки через 0.02 с после внезапного выброса. Очевидно, что скорость переноса пылевидного угля намного ниже скорости миграции газового потока: через 0.02 с после выброса расстояние в осевом направлении забоя составляет приблизительно 5 м для пылевидного угля, и почти 8 м — для газового потока.

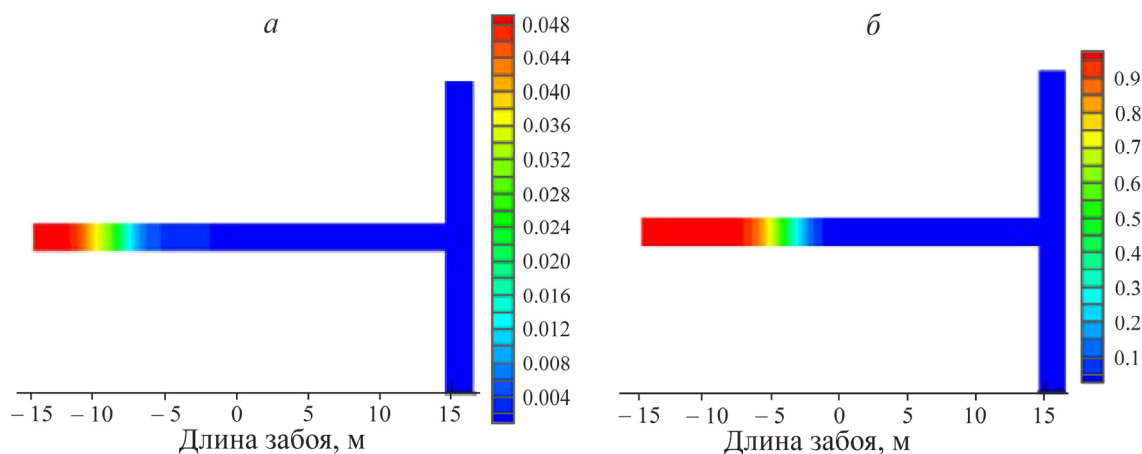


Рис. 4. Облако переноса пылевидного угля через 0.02 с (а) и облако “миграции” газового потока через 0.02 с (б)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментальная установка для физического моделирования закономерностей распространения ударных волн внезапного выброса построена для проверки корректности численного моделирования. Поскольку, как показал анализ энергии двухфазного потока из пылевидного угля и газа, напряжения являются доминирующими только в энергии упругости угля, значениями напряжений можно пренебречь. Следовательно, экспериментальную систему можно построить в виде “ударной” аэродинамической трубы [11, 39, 40], состоящей из полости выброса, модели выработки, датчиков давления и системы регистрации данных. Полость внезапного выброса и модель выработки разделены фартуком (рис. 5). Полость внезапного выброса представляет собой цилиндр диаметром 300 мм, высотой 500 мм, толщиной стен 10 мм, толщиной дна 15 мм и прочностью на сжатие 5 МПа. Модель выработки цилиндрическая со вспомогательными выработками различной длины и диаметра. Вспомогательные выработки соединены патрубками с резиновыми прокладками для герметизации. Фартук способен выдержать определенное давление, которое является критическим экспериментальным при моделировании выброса. Когда давление превышает максимальную прочность фартука, он разрушается и происходит выброс угля и газа. Следует отметить, что перед экспериментом по двухфазным выбросам проведены испытания максимальной прочности фартука с целью выбора соответствующего материала.

В экспериментах использованы датчики давления серии CYG с диапазоном измерений 0–1 МПа и частотной характеристикой 50 кГц, 8-канальная система регистрации данных с частотой отбора 10 В–500 м/с и памятью 40 Гб.

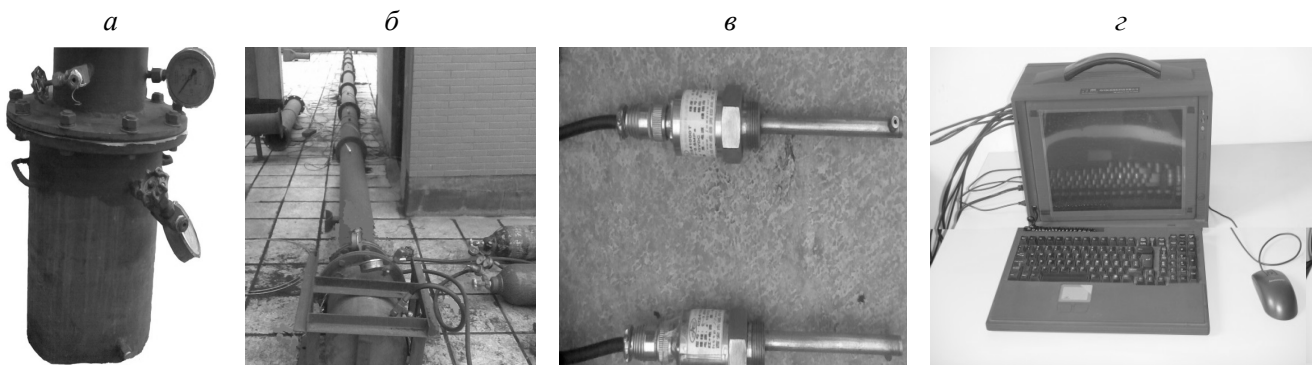


Рис. 5. Экспериментальное оборудование: *a* — полость выброса; *б* — модель выработки; *в* — датчики давления; *г* — регистратор данных

Физическое моделирование включало в себя:

- приготовление пробы угля. Заданное давление приложили к угольному образцу; затем уголь поместили в полость выброса;
- проверку герметичности. Полость выброса проверили на герметичность с помощью мыльной воды для обнаружения дефектов утечки;
- адсорбцию угольного газа. Перед сорбцией угольного газа провели дегазацию до состояния вакуума в течение 12 ч с помощью вакуумного насоса; затем уголь насыщали газом в течение 48 ч до состояния адсорбционного равновесия.

После подготовки датчиков давления и систем регистрации данных к фартуку прикладывали давление, намного превышающее адсорбционное равновесие, в результате чего произошел выброс.

Экспериментальные исследования распространения ударных волн внезапного выброса выполнены на описанном выше оборудовании. Исходное давление газа в полости выброса 0.9 МПа. На рис. 6 расстояние между полостью выброса и тремя датчиками давления составило: 3.4, 8 и 12 м. Датчики давления соединялись с системой регистрации данных, а выходы сигнала напряжения датчиков аккумулировались системой регистрации данных. Эти сигналы напряжения затем конвертировали в значения “сверхдавления”.

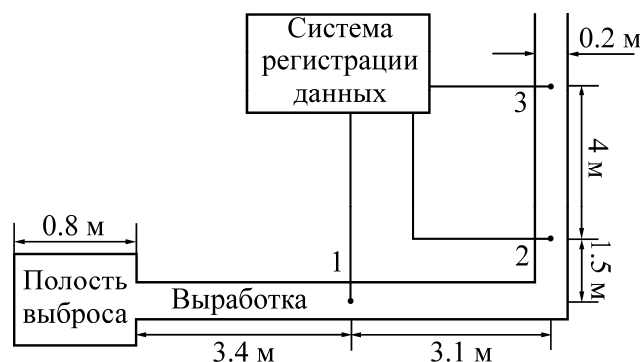


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

На рис. 7 показаны профили изменения “сверхдавления” газа относительно времени в трех точках. Максимальные значения “сверхдавления” ударных волн выброса в точках 1, 2 и 3 составили 0.255, 0.251 и 0.116 МПа соответственно. Когда ударные волны достигают “точек” измерения, давление резко изменяется и затем падает, что подтверждают результаты численного

моделирования. Сравнение максимальных значений “сверхдавления” между точками 2 и 1 показывает незначительное падение давления, главным образом за счет непрерывной дифракции “шокового” воздушного потока в результате столкновения со стенкой и отражения от нее.

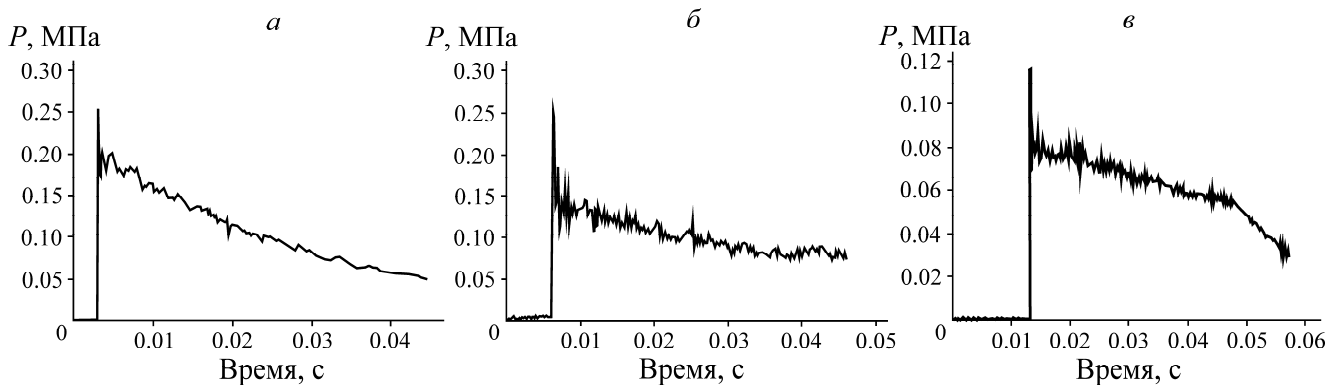


Рис. 7. Профили изменения “сверхдавления” газа P относительно времени: a — в точке 1; b — в точке 2; v — в точке 3

Численное моделирование выполнено с учетом экспериментальных данных. На рис. 8 приведены характеристики распространения ударной волны внезапного выброса. В точке измерения 1 максимальное избыточное сжатие составляет 0.231 МПа, что приблизительно соответствует экспериментальному результату при идентичных закономерностях затухания ударной волны выброса в численном и экспериментальном моделировании.

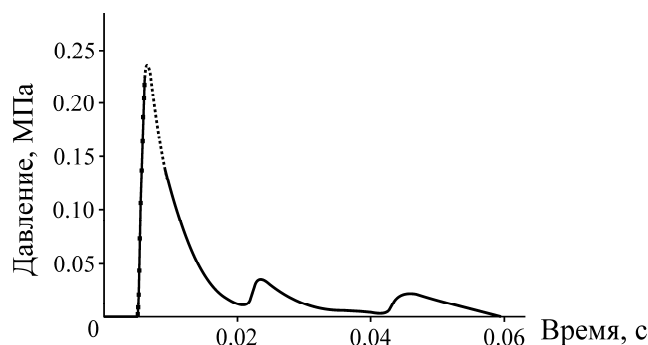


Рис. 8. Изменения “сверхдавления” газа относительно времени в точке 1 в численном моделировании

ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс механико-математического и физического моделирования распространения двухфазного потока из газа и пылевидного угля с учетом расширения газа на стадии развития внезапного выброса в угольной шахте позволил сделать заключение об адекватности предложенного метода численного моделирования.

Установлено, что упругая энергия угля составляет несколько тысячных от суммарной энергии внезапного выброса, поэтому на стадии его развития этот показатель можно не учитывать, а энергия переноса угля полностью генерируется за счет энергии расширения газа.

Метод численного моделирования и экспериментальная система для определения закономерности затухания данного двухфазного потока разработаны с учетом влияния энергии расширения газа на характеристики распространения двухфазного потока пылевидного угля и газа.

Пылевидный уголь и газ под высоким давлением практически мгновенно выталкиваются из полости от внезапного выброса, расширяются и сжимают воздух в выработке, создавая ударные волны выброса. Последние быстро распространяются в осевом направлении выработки.

Ударная волна, генерируемая потоком пылевидного угля и газа во время внезапного выброса, затухает в осевом направлении выработки. Объемная доля содержания пылевидного угля при этом играет важную роль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Большая Российская** энциклопедия: в 30 т. — М.: ОАО Научное изд-во “Большая Российская энциклопедия”, 2006. — Т. 5. — 463 с.
2. **Ходот В. В.** Внезапные выбросы угля и газа. — М., 1961. — 364 с.
3. **Проскураков Н. М.** Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках. — М.: Недра, 1980. — 264 с.
4. **Yuan L.** Control of coal and gas outbursts in Huainan mines in China: A review, *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4). — P. 559–567.
5. **Zhou H., Yang Q., Cheng Y.** Methane drainage and utilization in coal mines with strong coal and gas outburst dangers: A case study in Luling mine, China, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 20. — P. 357–365.
6. **Guo H., Cheng Y., Ren T.** Pulverization characteristics of coal from a strong outburst-prone coal seam and their impact on gas desorption and diffusion properties, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33. — P. 867–878.
7. **Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Gavrillov V. Yu., Shutilov R. A., Kovchavtsev A. P., Tanaino A. S., Efimov V. P., Astrakhantsev I. E., Grenev I. V.** Interaction of geomechanical and physicochemical processes in Kuzbass coal, *J. of Mining Science*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 191–214.
8. **Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Usol'tseva O. M., et al.** Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature, *J. of Mining Science*, 2015, Vol. 51. — P. 641–658.
9. **Опарин В. Н., Киряева Т. А.** Генетические причины выбросо- и пожароопасности угольных пластов Кузбасса // ГИАБ. — 2015. — № 3. — С. 400–413.
10. **Опарин В. Н., Киряева Т. А.** Геомеханические и физико-химические процессы, определяющие выбросо- и пожароопасность угольных пластов Кузбасса // Тезисы IV Российско-Китайской научной конференции. — Владивосток: Дальневост. федеральн. ун-т, 2014. — С. 40–41.
11. **Yang W., Liu B., Zhai C., et al.** How in situ stresses and the driving cycle footage affect the gas outburst risk of driving coal mine roadway, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 31. — P. 139–148.
12. **Кричевский Р. М.** О природе внезапных выделений газа с выбросом угля // Бюл. МакНИИ. — 1948. — № 18.
13. **Христианович С. А.** Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Изв. АН СССР. ОТН. — 1953. — № 12. — С. 1673–1678.
14. **Христианович С. А.** О волне выброса // Изв. АН СССР. ОТН. — 1953. — № 12. — С. 1679–1688.
15. **Никольский А. А.** О волнах разрушения газированных пород // ДАН. — 1953. — Т. 91. — № 5. — С. 1035–1038.
16. **Biot M.** General theory of three dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, 1941, Vol. 12, No. 2.
17. **Кузнецов С. В., Кригман Р. Н.** Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения. — М.: Наука, 1978. — 122 с.
18. **Кузнецов С. В., Бобин В. А.** К вопросу о кинетике десорбции при газодинамических явлениях в угольных пластах // ФТПРПИ. — 1980. — № 2.
19. **Федоров А. В., Фомин В. М., Охунов М. Х.** Определение толщины волны дробления Христиановича с учетом неравновесной неизометрической десорбции // ФТПРПИ. — 1981. — № 1.

20. Фейт Г. Н., Малинникова О. Н. Особенности и закономерности геомеханических и физико-механических процессов формирования очагов опасности газодинамических явлений в шахтах // ГИАБ. — 2007. — Т. 13. — № 1.
21. Федоров А. В., Федорченко И. А. Математическое моделирование распространения метана в угольных пластах // ФТПРПИ. — 2009. — № 1. — С. 15–29.
22. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. III: 2014. — № 4. — С. 10–38; Ч. IV: 2016. — № 1. — С. 3–49.
23. Опарин В. Н. К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 3–19.
24. Федоров А. В. Описание ударной волны в угольном пласте при неравновесной десорбции // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 44–48.
25. Otuonye F., Sheng J. A numerical simulation of gas flow during coal/gas outbursts, *Geotechnical & Geological Engineering*, 1994, 12(1). — P. 15–34.
26. Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 3–19.
27. Опарин В. Н., Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Измерительная система и испытательный стенд для контроля акусто-деформационных и тепловых полей, индуцируемых в процессах флюидоразрушения твердых тел // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 180–191.
28. Cheng W., Liu X. Y., Wang K. J., et al. Study on regulation about shock-ave-front propagating for coal and gas outburst, *J. of China Coal Society*, 2004, 29(1). — P. 57–60.
29. Zhao W., Cheng V., Jiang H., et al. Role of the rapid gas desorption of coal powders in the development stage of outbursts, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 28. — P. 491–501.
30. Wang K., Zhou A., Zhang J., Zhang P. Real-time numerical simulations and experimental research for the propagation characteristics of shock waves and gas flow during coal and gas outburst, *Safety Science*, 2012, 50(4). — P. 835–841.
31. Zhou A., Wang K., Wang L., et al. Numerical simulation for propagation characteristics of shock wave and gas flow induced by outburst intensity, *Int. J. of Mining Science and Technology*, 2015, 25(1). — P. 107–112.
32. Zhou A., Wang K., Wu Z. Propagation law of shock waves and gas flow in cross roadway caused by coal and gas outburst, *Int. J. of Mining Science and Technology*, 2014, 24(1). — P. 23–29.
33. Manjula E. V. P. J., Ariyaratne W. K. H., Ratnayake C., et al. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport, *Powder Technology*, 2016.
34. Mittal A., Mallick S. S., Wypych P. W. An investigation into pressure fluctuations for fluidized dense-phase pneumatic transport of fine powders, *Powder Technology*, 2015, 277. — P. 163–170.
35. Setia G., Mallick S. S., Pan R., Wypych P. W. Modeling solids friction factor for fluidized dense-phase pneumatic transport of powders using two layer flow theory, *Powder Technology*, 2016, 294. — P. 80–92.
36. Stevanovic V. D., Stanojevic M. M., Jovovic A., et al. Analysis of transient ash pneumatic conveying over long distance and prediction of transport capacity, *Powder Technology*, 2014, 254. — P. 281–290.
37. Wang Y., Williams K. C., Jones M. G., Chen B. Gas-solid flow behaviour prediction for sand in bypass pneumatic conveying with conventional frictional-kinetic model, *Applied Mathematical Modelling*, 2016.
38. Zhao W., Cheng Y., Guo P., et al. An analysis of the gas-solid plug flow formation: New insights into the coal failure process during coal and gas outbursts, *Powder Technology*, 2016.
39. Han J., Zhang H. W., Li S., Song W. H. The characteristic of in situ stress in outburst area of China, *Safety Science*, 2012, 50(4). — P. 878–884.
40. Hu Y., Zhang Q., Zhu S. Analysis on simulation experiment of outburst in uncovering coal seam in cross-cut, *Procedia Engineering*, 2012, 45. — P. 287–293.

Поступила в редакцию 1/VI 2017