

ПРИЛОЖЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА УГЛЯ

А.В. Федоров, И.А. Федорченко

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, 630090, улица Институтская 4/1*

Аннотация

Рассматривается задача о распаде произвольного разрыва в механике гетерогенных сред (МГС), которая допускает физическую трактовку как проблема внезапного выброса угля и газа в выработанное пространство шахты. Исследование ведется в рамках одномерного неравновесного по скоростям и температурам подхода МГС. Привлекаются две математические модели: с учетом и без учета межгранулярного взаимодействия частиц. Для расчета адаптирован численный метод СИР.

IMPLEMENTATION OF MODELS OF HETEROGENEOUS MEDIA MECHANICS TO A PROBLEM OF COAL OUTBURST

A.V. Fedorov, I.A. Fedorchenko

ITAM SB RAS, Russia, Novosibirsk, 630090

A Riemann problem in the frame of heterogeneous media mechanics is considered. It can be thought of as a coal-gas mixture outburst in mined-out area. The investigations are performed in the frame of 1D non-equilibrium on velocities and temperatures approach of heterogeneous media mechanics. Two mathematical models are used namely with taking into account and without taking into account the inter-granular interactions. For the numerical realization CIP (Cubic Interpolation Polynomial) method is utilized.

1. ВВЕДЕНИЕ

Физико-математическое моделирование внезапных выбросов угля является актуальной задачей в связи с необходимостью их предсказания и разработкой методов снижения негативных последствий. Подходы к моделированию подобных явлений были заложены в работах С.А. Христиановича [1, 2] и А.А. Никольского [3]. Согласно этим приближениям, процесс выброса описывается как движение двухфазной гетерогенной среды, газовой компонентой которой является метан, а твердая фаза — мелкие частицы угля. В работе [4] данная математическая модель обобщена на случай движения смеси газа и мелких частиц угля в двухскоростном двухтемпературном приближении механики гетерогенных сред (МГС) с учетом процесса неравновесной десорбции. На ее основе в рамках равновесного по скоростям и температурам подхода решена задача о сдвигении призабойной части массива, поставленная как задача Лагранжа о движении поршня. В [5] показано аналитическое решение задачи о внезапном выбросе из раздробленного полубесконечного угольного пласта. Вычислена, в частности, скорость переднего фронта волны внезапного выброса для односкоростного континуума смеси газа и угольных частиц.

В настоящий момент разработаны и используются новые математические модели МГС, учитывающие, в частности, напряжения межгранулярного взаимодействия частиц, их конечную объемную концентрацию в смеси и различия скоростей и температур фаз. Таким образом, представляется интересным исследовать проблему внезапного выброса в рамках новых подхо-

дов, проследить влияние учета различных факторов на предсказание параметров и картину течения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Основные уравнения

В настоящей работе для решения задачи о внезапном выбросе используем два подхода механики гетерогенных сред: без учета и с учетом взаимодействия частиц твердой фазы между собой. В первом случае для описания движения газугольной смеси применим модель механики неравновесных гетерогенных сред с учетом лишь давления газовой фазы. Модель включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии для газовой и твердой фазы в предположении несжимаемости последней, а также уравнение состояния с коволюмом, учитывающее присутствие частиц в течении. В неконсервативном виде система записывается как

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} &= 0, & \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} &= 0, \\ \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) &= m_1 \frac{\partial p}{\partial x} - f_{12}, \\ \rho_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) &= m_2 \frac{\partial p}{\partial x} + f_{12}, \\ \rho_1 \left(\frac{\partial e_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial e_1}{\partial x} \right) &= \\ &= \frac{m_1 p}{\rho_{11}} \left(\frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \rho_{11}}{\partial x} \right) - f_{12}(u_2 - u_1) - q_{12}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial e_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial e_2}{\partial x} \right) = f_{12}(u_2 - u_1) + q_{12},$$

$$p = \rho_{11} R T_1,$$

где $f_{12} = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_{11} m_2}{r_p} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|$ — сила межфаз-

ного взаимодействия; $q_{12} = \frac{3}{2} \frac{m_2 \lambda Nu}{r_p^2} (T_1 - T_2)$ — теп-

лообмен между фазами. Для расчета коэффициента сопротивления частиц C_D использовалась трехдиапазонная формула, взятая в [6],

$$C_D = \begin{cases} C_1 = \frac{24}{Re} + \frac{4.4}{Re^{0.5}} + 0.42, & m_2 \leq 0.08, \\ C_2 = \frac{4}{3m_1} \left(1.75 + 150 \frac{m_1}{Re} \right), & m_2 > 0.45, \\ \frac{(m_2 - 0.08)C_2 + (0.45 - m_2)C_1}{0.35}, & 0.08 < m_2 \leq 0.45 \end{cases}$$

Модель с учетом сил взаимодействия между частицами построена в рамках изотермического двухскоростного подхода МГС. В данном случае в рассмотрение вводится межгранулярное давление p_s :

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\frac{m_1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f_{12}}{\rho_1},$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{m_2}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_s}{\partial x} + \frac{f_{12}}{\rho_2} \quad (2)$$

Для замыкания системы (2) требуется два уравнения состояния. Для межгранулярного давления используется соотношение

$$p_s = \rho_2 [1 + 2(1 + e)m_2 g_0] \Theta, \quad (2.1)$$

а давление газовой фазы определяется из изотермического уравнения

$$p = \frac{a_1^2 \rho_1}{1 - \rho_2 / \rho_{22}} \quad (2.2)$$

Здесь Θ — так называемая гранулярная температура (имеющая, тем не менее, размерность удельной энергии, так как эта величина характеризует кинетическую энергию хаотического взаимодействия частиц между собой), которую мы полагаем на первом этапе исследования постоянной; a_1 — скорость звука в чистом газе. Функция радиального распределения вычисляется как $g_0 = \left[1 - \left(\frac{m_2}{m_{2,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1}$, а коэффициент релаксации (восстановления) e постоянный и равен 0.995.

Поскольку в решаемой задаче присутствует газовая фаза, состоящая из двух компонент, для отслеживания границы раздела между ними вводилось дополнительное уравнение для массовой концентрации η одного

$$\text{из газов вида } \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0.$$

2.2. Численный метод

Для решения начально-краевых задач о волновых процессах в газозвесах на основе предложенных типов моделей применялся СР-метод [7]. Основным требованием при его разработке являлось точное воспроизведение контактных разрывов и ударных волн. С этой целью в каждой расчетной ячейке проводится интерполирование профилей параметров кубическим полиномом. Неконвективные члены рассчитываются при помощи центральной конечно-разностной аппроксимации. Недостаток метода состоит в его неконсервативности, что ограничивает его применение. Для уверенности в получении достоверного результата проводилась проверка устойчивости и сходимости вычислений, а также были выполнены тестовые расчеты. Описание схемы и тестового расчета задачи о распаде разрыва представлены в [8, 9]. Результаты тестов были сопоставлены с имеющимися в литературе расчетными данными и показали хорошее соответствие всех параметров [10].

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

3.1. Постановка задачи

Перейдем к решению поставленной задачи о внезапном выбросе угля и газа. Для этого рассмотрим угольный пласт, призабойный участок которого внезапно раздавлен, и представляет собой смесь газа и твердых частиц. Будем полагать, что длина этого участка L , а давление в нем p_1 (рис. 1). Давление в выработанном пространстве равно атмосферному p_0 , т.е. физическая задача о внезапном выбросе сводится к решению задачи о распаде комбинированного разрыва в рамках МГС. Решение проводится в рамках одномерного нестационарного подхода. Схема области будущего течения в начальный момент времени представлена на рис. 1.

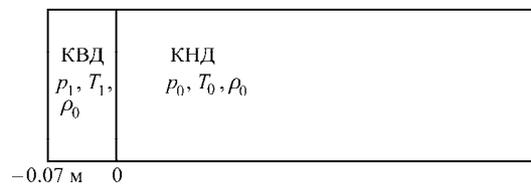


Рис. 1. Схема задачи

Разрыв располагается в точке $x = 0$, справа от него находится выработанное пространство. Будем трактовать его как камеру низкого давления (КНД). Слева от разрыва расположена камера внезапного выброса, заполненная газозвесью, назовем ее камерой высокого давления (КВД). В общем случае она содержит метан и частицы угля. Для физического тестирования математической модели (1) рассмотрим КВД со смесью частиц

угля и гелия. Это обусловлено имеющимися экспериментальными и расчетными данными [6, 10].

В начальный момент времени среда по обе стороны от диафрагмы покоится, температура в камерах одинакова. Исходные параметры взяты из работы [6], основные из которых приведены в таблице 1. На левом конце расчетной области ставятся условия жесткой стенки, на правом — неотражающие условия.

Таблица 1

Начальные данные для задачи о внезапном выбросе

Параметр	КВД	КНД
Температура, К	300	300
Массовая доля гелия	1	0
Объемная концентрация частиц	0.1625	10^{-9}
Скорость, м/с	0	0
Давление, МПа	3.55	0.101
Плотность частиц, кг/м ³	1460	—

Расчетные параметры обезразмеривания следующие: для плотности — плотность воздуха при атмосферном давлении $\rho_{1,0} = 1.177 \text{ кг/м}^3$, давление — $p_0 = 101340 \text{ Па}$, скорость — $\sqrt{p_0/\rho_{1,0}}$, внутренняя энергия — $p_0/\rho_{1,0}$, температура — $p_0/\rho_{1,0}c_v$, где $c_v = 720 \text{ Дж/(кг·К)}$. Далее все величины приводятся в безразмерном виде, если не указано другое.

3.2. Результаты расчета в рамках модели механики гетерогенных сред с общим давлением газа

Результаты расчета данной задачи сравнивались с [6], где проводилось численное моделирование в рамках аналогичной модели методом крупных частиц. На рис. 2 показаны распределения давления на момент времени 330 мкс для случая чистого газа (сплошная кривая 1), смеси с концентрацией частиц $m_2 = 0.1625$ и диаметром 20 мкм (пунктирная кривая 2) и 100 мкм (штрихпунктирная кривая 3). Тонкими линиями показаны результаты [6], жирными — полученные в настоящей работе методом СР.

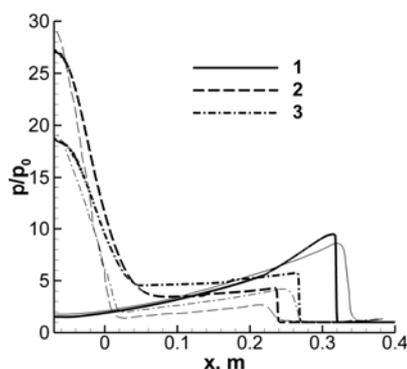


Рис. 2. Распределение давления на один момент времени для трех различных концентраций смеси: сравнение расчетов настоящей работы и [6]

Как можно видеть, в результате распада реализуется следующая картина течения. Вправо, в область выработанного пространства, распространяется ударная волна (УВ) с числом Маха $M \approx 2.5$, фронт которой четко воспроизводится методом СР, влево бежит волна

разрежения (ВР), которая затем отражается от твердой стенки и со временем нагоняет лидирующую ударную волну. Можно наблюдать примерное соответствие скоростей распространения УВ, полученных по методу крупных частиц первого порядка, используемого в [6], и методом СР. Амплитуды волн при этом различаются, что можно объяснить повышенной диссипативностью метода низкого порядка, применяемого в [6]. Данные по скорости переднего фронта ВР также коррелируют между собой.

В случае расчета задачи в отсутствии частиц, т.е. распада разрыва в чистом газе (кривая 1), волна разрежения догоняет фронт УВ на показанный момент времени, как видно из графика. Известно, что распространение волны разрежения в смеси с частицами происходит медленнее из-за присутствия сил межфазного взаимодействия, поэтому ВР в задаче о распаде комбинированного разрыва не успевает догнать фронт ударной волны. Скорость комбинированного разрыва в смеси, в свою очередь, также ниже, чем скорость ударной волны в чистом газе. С уменьшением диаметра частиц при фиксированной концентрации суммарная площадь их поверхности увеличивается, вследствие чего происходит торможение как фронта УВ, так и ВР.

Зависимость числа Маха УВ от начального перепада давления на разрыве показана на рис. 3.

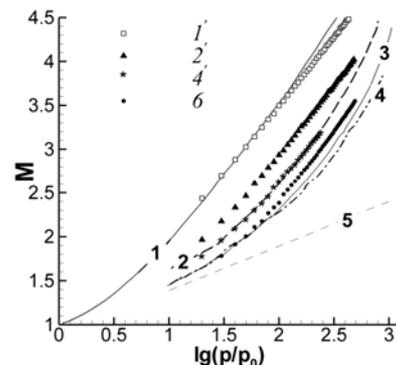


Рис. 3. Зависимость числа Маха УВ от начального перепада давления для различных параметров смеси

Линиями представлены данные работы [6]: кривая 1 соответствует расчету в чистом газе; 2 — при $m_2 = 0.1625$ и диаметре частиц 100 мкм; 3 — эксперимент [10]; 4 — смесь при $m_2 = 0.1625$ и диаметре частиц 20 мкм, кривая 5 соответствует равновесному течению. Символы 1', 2', 4' отражают результаты расчетов настоящей работы в условиях, аналогичных кривым 1, 2 и 4, соответственно. Данные 6' получены при моделировании смеси с частицами с диаметром 10 мкм. Наблюдается хорошее совпадение данных при расчете газодинамической задачи о распаде разрыва (линия 1 и символы 1'). При переходе к течениям гетерогенных сред, вычисления по методу СР предсказывают более высокую скорость УВ, чем в работе [6]. Это может быть связано с более четким разрешением фронта методом высокого порядка (см. рис. 2). С уменьшением размера частиц при фиксированной объемной концентрации происходит уменьшение скорости УВ, как и предсказано расчетами по обеим схемам. Экспериментальные данные [10] лучше описы-

ваются в рамках настоящих расчетов при диаметре части 10 мкм (линия б).

3.3. Результаты расчета в рамках модели (2)

Немонотонность поведения скорости волны разрежения. Расчеты поставленной задачи проведены также в рамках модели, учитывающей межгранулярное давление, обусловленное столкновением и взаимодействием частиц друг с другом. Авторами исследовано влияние данного фактора на параметры течения при высоких значениях загрузки потока частицами, т.е. при концентрации дисперсной фазы, близкой к насыпной. На рис. 4, а представлены распределения давления газовой фазы на начальный момент времени (кривая 1) и при 330 мкс для умеренных значений концентрации частиц в КВД (0.1 — линия 2, 0.2 — линия 3 и 0.4 — линия 4). В диапазоне невысоких значений концентрации ($m_2 \approx 0 \div 0.3$) при увеличении концентрации твердой фазы скорость фронта УВ, как и скорость передней точки волны разрежения, уменьшается. Это обусловлено необходимостью переноса большей массы частиц при прежнем давлении газа. При этом фронт волны разрежения становится более “крутым” с увеличением объема частиц в слое.

При переходе к более высоким объемным концентрациям в КВД скорость фронта УВ перестает снижаться, а скорость головы ВР заметно увеличивается, и ее структура существенно изменяется. Это можно видеть на рис. 4, б, где также показаны распределения давления на моменты времени 0 (кривая 1) и 330 мкс для начальных концентраций частиц в слое 0.5 и 0.6 (кривые 2 и 3, соответственно).

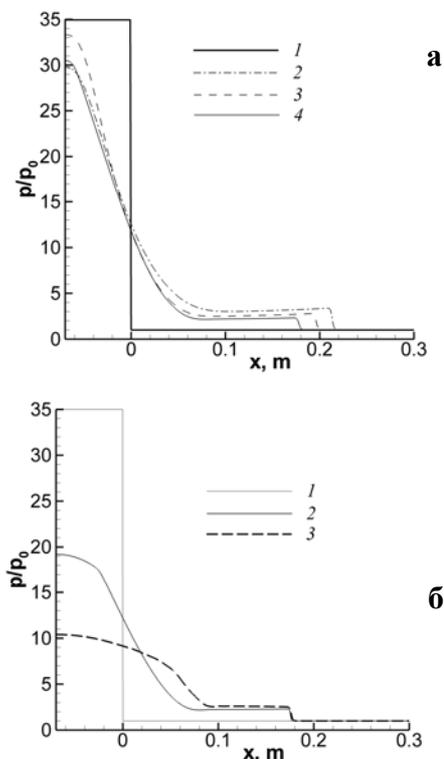


Рис. 4. Зависимость давления газовой фазы от объемной концентрации частиц

Таким образом, скорость распространения ВР внутри плотного слоя ведет себя немонотонно в зави-

симости от концентрации дисперсной фазы: при небольших загрузках наблюдается снижение скорости с увеличением концентрации, при высоких плотностях происходит ускорение ВР с ростом m_2 .

Для того чтобы выяснить природу этого явления, проанализируем зависимость равновесной скорости звука в смеси от объемной концентрации частиц. Как известно, наблюдаемая скорость волны разрежения в смеси определяется этой величиной. Аналитическое выражение для равновесной скорости звука в смеси, где скорости фаз полагаются равными, имеет вид

$$a_e^2 = \frac{\xi_1 a_1^2}{m_1^2} + \xi_2 \Theta + 2\xi_2 m_2 \Theta (1+e) \left[2g_0 + \left(\frac{m_2}{m_{2,max}} \right)^{1/3} \frac{g_0^2}{3} \right]. \tag{3}$$

Используя это выражение, находим, что равновесная скорость звука в смеси с объемной концентрацией твердой фазы 0.5 и 0.6 при $\Theta = 1000$ Дж/кг составляет 340 и 1141 м/с соответственно, что говорит об ее росте и, следовательно, ускорении распространения волновых процессов в слое почти в 3 раза. Отметим при этом, что замороженная скорость звука в гелии, находящемся под давлением в 35 атмосфер, составляет 1020 м/с. Таким образом, скорость звука в смеси при переходе к значению объемной концентрации частиц 0.6 становится больше, чем в чистом газе. Иными словами, возмущения быстрее распространяются в твердой фазе.

Графическое представление равновесной скорости звука, рассчитанной по формуле (3), приведено на рис. 5, где показаны данные для равновесной скорости звука в присутствии межгранулярного давления (сплошная линия) и без него (пунктирная линия).

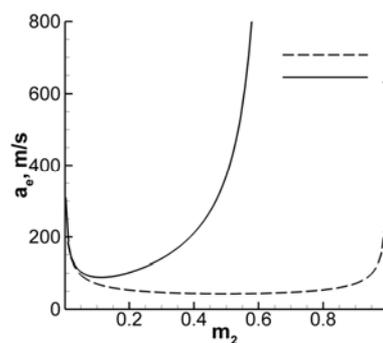


Рис. 5. Зависимость от равновесной скорости звука в смеси объемной концентрации частиц

В обоих случаях зависимость немонотонна: она убывает, начиная с максимальной скорости в чистом газе, и достигает минимума при средних значениях концентраций. Равновесная скорость звука по модели (2) резко возрастает в диапазоне концентраций дисперсной фазы $0.4 \div 0.6$ и имеет асимптоту при максимальной загрузке $m_{2,max} = 0.65$. Величина межгранулярного давления при этом становится бесконечно большой (что, конечно, является дефектом модели). Минимальное значение равновесной скорости звука при заданной гранулярной температуре в смеси гелия и твердых частиц достигается при объемной концентрации частиц $m_2^* = 0.22$. Будем назы-

вать эту величину концентрации критической. При этом равновесная скорость звука в модели (1), без учета межгранулярного давления, возрастает медленнее и стремится к максимальному значению при $m_2 \rightarrow 1$, а минимум имеет при 0.5.

Отметим, что данные аналитических расчетов равновесной скорости звука, как и ожидалось, совпадают с результатами численного моделирования, полученными путем оценки скорости распространения волны разрежения в смеси.

Анализ картины течения при различных концентрациях твердой фазы ($m_2 > m_2^*$). На рис. 6 приведено сопоставление картин распространения ВР для объемной концентрации частиц в КВД 0.5 (тонкие линии) и 0.6 (толстые линии) на примере распределения объемной концентрации частиц (рис. 6, а) и давления газа (рис. 6, б) на более поздний период времени. Номера кривых соответствуют моментам времени: 1 — начальный момент; 2 — 100 мкс; 3 — 700 мкс. На момент времени 700 мкс можно наблюдать, что фронт УВ при $m_2 = 0.5$ отстает от УВ при $m_2 = 0.6$, т.е. происходит увеличение скорости скачка при росте плотности слоя.

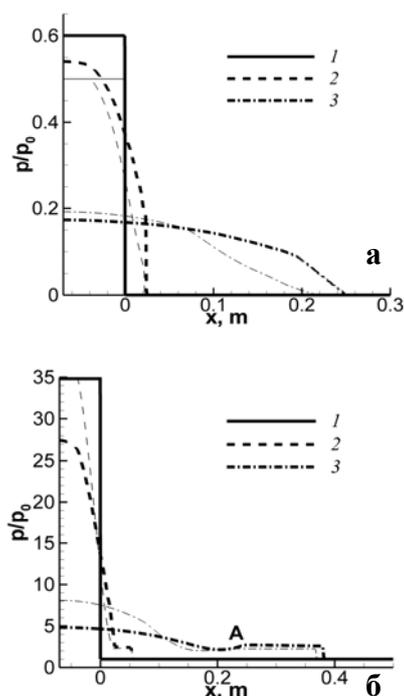


Рис. 6. Распределение объемной концентрации частиц (а) и давления газовой фазы (б) на разные моменты времени для двух начальных значений концентрации частиц

Можно видеть существенно различающийся характер профилей контактного разрыва и волны разрежения для этих двух концентраций, что обусловлено резким увеличением равновесной скорости звука, т.е. скорости распространения волны разрежения, при переходе от концентрации 0.5 к 0.6. В более плотной смеси фронт ВР становится более крутым, как и профиль контактного разрыва между смесью и чистым газом. Объясняется это приведенными выше причинами.

Отметим возникновение области разрежения, возникающей вблизи от “пробки” газозольной смеси

(зона А на рис. 6, б). Это происходит вследствие того, что на данный момент времени “пробка” значительно расширяется и, тем самым, оказывает меньшее сопротивление истечению газа из нее. В результате и образуется волна разрежения,двигающаяся внутрь области, занятой газозольной смесью.

Более детально динамика начального этапа развития течения в выработанном пространстве при $m_2 = 0.6$ представлена на рис. 7, а, где показано распределение давления газа на 13 моментов времени в диапазоне 0 ÷ 330 мкс, и на рис. 7, б, демонстрирующем поведение объемной концентрации частиц. Фронт ударной волны, прошедший в газ, со временем удаляется от комбинированного разрыва и движется вправо с неизменной амплитудой. “Пробка” постепенно расширяется, вовлекаясь в движение за лидирующей ударной волной, и ее передняя кромка все более выполаживается, как видно из рис. 8, а, где получены распределения концентрации частиц на более длительные моменты времени (от 0 до 15 мс с интервалом в 1 мс).

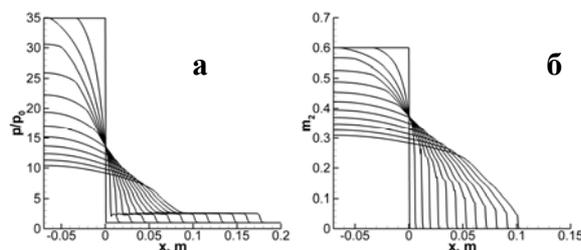


Рис. 7. Давление газовой фазы (а), объемная концентрация частиц (б) на период времени от 0 до 330 мкс при $m_2 = 0.6$ в КВД

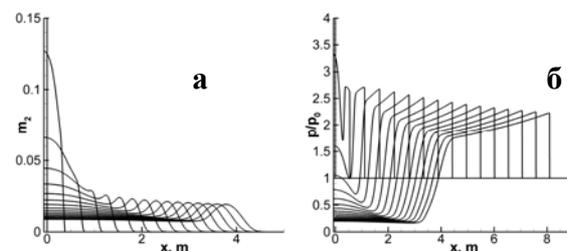


Рис. 8. Распределения объемной концентрации частиц (а) и давления газа (б) на период времени от 0 до 15 мс при $m_2 = 0.6$ в КВД

Иными словами, резкая в начальные моменты времени граница между газом и частицами уменьшается по амплитуде параметра m_2 , и на последующие моменты времени образуется переходная область перемешивания частиц и газа, с концентрацией частиц, начинающейся от нуля. Действительно, объемная доля дисперсной фазы снижается до 0.01, а толщина слоя за 15 мс возрастает от 0.07 до 4.5 м. Фронт УВ при этом ослабляется догоняющей его волной разрежения (см. рис. 8, б). Давление в пристенной области КВД сначала понижается до значения в КНД, а затем в области за фронтом УВ образуются зоны давления ниже номинального, т.е. области разрежения. Это обусловлено сильным расширением “пробки” в выработанное пространство.

Распределения межгранулярного давления на 10 моментов времени от 0 до 330 мкс при расчете с на-

чальной концентрацией частиц в КВД 0.5 и значении гранулярной температуры 1000 Дж/кг представлено на рис. 9, а. В начальный момент времени справа от разрыва эта величина нулевая, поскольку в данной области частицы отсутствуют. С развитием процесса распространения УВ в КНД происходит вовлечение частиц в течение за ее фронтом, и, следовательно, межгранулярное давление становится отличным от нуля. На распределении плотности частиц (рис. 9, б) можно проследить динамику КБР, которая аналогична описанному выше случаю начальной концентрации 0.6, хотя движение КБР замедленно по сравнению с ним. Это объясняется более высоким значением скорости звука в смеси с концентрацией 0.6, и повышенным уровнем межгранулярного давления, которое зависит от плотности слоя.

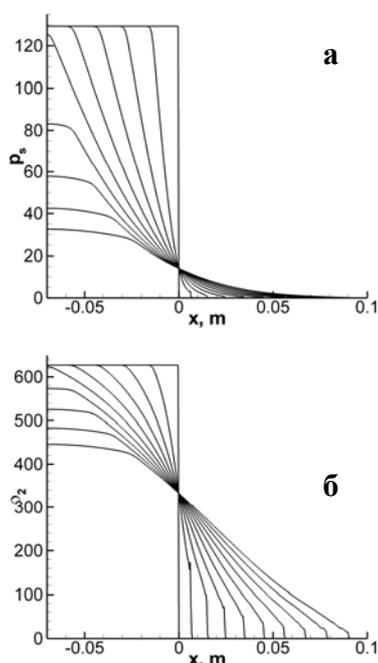


Рис. 9. Распределение межгранулярного давления (а) и плотности твердой фазы (б) на разные моменты времени

Влияние межгранулярного давления. Рассмотрим, к чему приводит учет межгранулярного давления при расчете решаемой задачи. На рис. 10 сравнение распределений давления газовой фазы с учетом (пунктирные линии) и без учета гранулярного давления (сплошные линии) на разные моменты времени (кривая 1 — 0 мкс; 2 — 110 мкс; 3 — 330 мкс) показывает, что скорость волны разрежения в дисперсной фазе, как и скорость ударной волны в воздухе, возрастает при учете эффектов межгранулярных взаимодействий. Оказалось, что ускорение ударной волны составляет до 10% относительно расчета без учета гранулярной составляющей. Амплитуда ударной волны при этом также слегка увеличивается. Как уже отмечалось, увеличение скорости волны разрежения объясняется более резким ростом скорости звука в смеси при расчете по модели (2). Также рост амплитуды ударной волны можно объяснить и наличием повышенного давления за счет гранулярной компоненты.

В качестве обобщенной диаграммы процесса внезапного выброса рассмотрим зависимость числа Маха ударной волны от начального перепада давления на разрыве при объемной концентрации дисперсной фазы 0.1635 (рис. 11). Линии, полученные при расчете частиц диаметром 20 мкм с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) в изотермическом приближении демонстрируют вышеописанное свойство увеличения скорости фронта УВ при учете межгранулярного взаимодействия частиц.

Для сравнения на данном рисунке также приведены расчеты работы [6] (кривая 3). Поведение кривых настоящего исследования и [6] при фиксированной концентрации частиц согласуется между собой, в количественном отношении разница, вероятно, обусловлена учетом температурного фактора в модели [6].

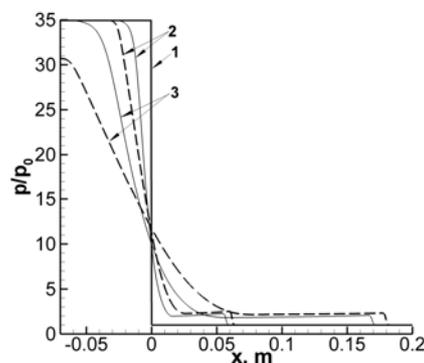


Рис. 10. Давление в газе с учетом и без учета межгранулярного давления при объемной концентрации 0.5

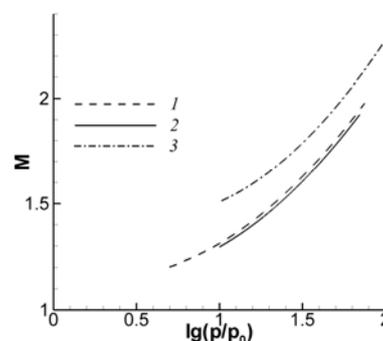


Рис. 11. Зависимость числа Маха УВ от начального отношения давления на разрыве

Проведем параметрический анализ влияния гранулярной температуры и оценим ее влияние на картину течения. Все предыдущие расчеты проведены для $\Theta = 1000$ Дж/кг. При увеличении этого значения, характеризующего кинетику столкновений между частицами, происходит рост амплитуды и скорости головной УВ, как видно на рис. 12. Распределения параметров представлены на моменты времени от 0 до 330 мкс с равными интервалами. Кривые 1 соответствуют расчетам при значении гранулярной температуры 1000 Дж/кг, кривые 2 — 5000 Дж/кг. Скорость волны разрежения при распространении ее по смеси также увеличивается при фиксированной концентрации частиц, что можно объяснить увеличением равно-

весной скорости звука в смеси при увеличении гранулярной температуры, как показывает формула (3).

Расчет в условиях свойств реальных материалов. Для сопоставления полученных результатов с расчетами при использовании реальных параметров материалов, присутствующих в угольных пластах, были проведены вычисления для смеси метана и угля в КВД длиной 0.7 м. Известно, что реальные размеры каверн выброса в угольных шахтах составляют порядка нескольких метров и более. Поскольку в данной работе не проводятся количественные оценки расстояния выброса угля, длина КВД определялась авторами из соображений экономичности проводимых расчетов. Концентрация частиц равнялась 0.6, перепад давления на разрыве 35, диаметр частиц 200 мкм.

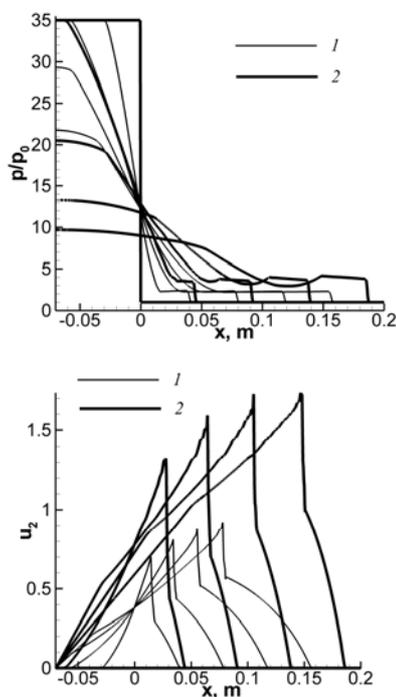


Рис. 12. Распределение давления смеси (а), скорости дисперсной фазы (б) на разные моменты времени при различных значениях гранулярной температуры. Объемная концентрация частиц $m_2 = 0.5$ и диаметр 20 мкм

Полученные распределения давления газовой фазы и межгранулярного давления показаны на рис. 13.

Можно видеть, что качественно поведение ударно-волновых структур и контактных разрывов не отличается от вышеописанных случаев. Происходит истечение смеси из камеры высокого давления, КБР при этом движется с возрастающей скоростью, которая достигает 330 м/с на момент времени 3 мс. Прошедшая в слой волна разрежения снижает концентрацию частиц в слое, что приводит к замедлению скорости распространения отраженной от стенки волны, т.к. равновесная скорость звука (с которой распространяется передний фронт волны разрежения при больших временах) уменьшается. Это приводит к тому, что фронт лидирующей УВ дольше сохраняет свою интенсивность, т.к. ВР догоняет его на более поздние моменты времени.

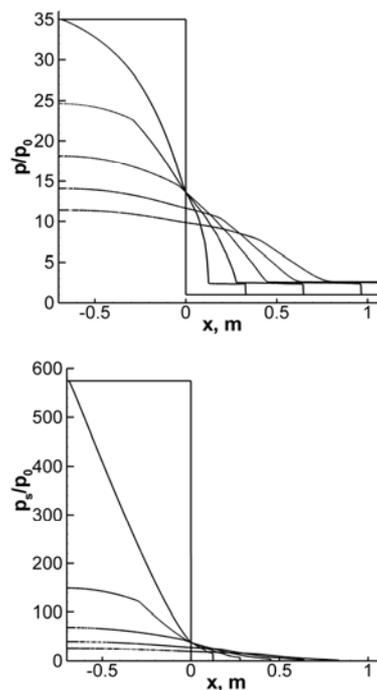


Рис. 13. Распределение давления смеси (а), гранулярного давления (б) на моменты времени 0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 и 3 мс при начальной концентрации угля в КВД 0.6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках неравновесного подхода механики гетерогенных сред с учетом и без учета межгранулярного давления твердой фазы проведены расчеты задачи о внезапном выбросе угля и газа в одномерной нестационарной постановке.

Выполнена верификация соответствующих математических моделей на основе имеющихся в литературе расчетных и экспериментальных данных, показано влияние учета гранулярного давления и величины энергии взаимодействия частиц на картину течения.

Выявлено критическое значение объемной концентрации частиц угля, которое характеризует немонотонную зависимость скорости распространения волны разрежения в слое частиц и скорости ударной волны в газе от пористости слоя.

Показано, что более длительный период сохранения интенсивности прошедшей в выработанное пространство ударной волны обусловлен увеличением пористости в слое за прохождения волны разрежения.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- h — шаг расчетной сетки;
- $\rho_i = m_i \rho_{ii}$ — приведенные плотности фаз, кг/м³;
- ρ_{ii} — истинные плотности фаз, кг/м³;
- m_i — объемная концентрация i -й фазы;
- u_i — скорость, м/с;
- T_i — температура, К;
- e_i — внутренняя энергия, Дж/кг;
- p — давление в газе, Па;
- R — газовая постоянная;
- a_1 — скорость звука в газе, м/с;
- r_p — радиус частиц, м;

λ — коэффициент теплопроводности;
Nu — число Нуссельта;
 C_D — коэффициент сопротивления частиц;
 p_s — межгранулярное давление, Па;
 Θ — гранулярная температура, Дж/кг;
 c_v — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/(кг·К).
 g_0 — функция радиального распределения;
 η — массовая концентрация одной из газовых компонент;
 e — коэффициент реституции.

Индексы:

1 — газовая фаза;
2 — твердая (дисперсная) фаза;
0 — начальное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христианович С.А. Об основах теории фильтрации // ФТПРПИ. № 5. 1989.
2. Христианович С.А. О волне выброса // Изв. Академии наук СССР. Отделение техн. наук. № 12. 1953.
3. Никольский А.А. О волнах внезапного выброса газированных пород // Доклады АН СССР. Т. LXXXVIII. № 4. 1953.
4. Ворожцов Е.В., Федоров А.В., Фомин В.М. Движение смеси газа и частиц угля в шахтах с учетом явления десорбции // Аэромеханика. М., 1976.
5. Федоров А.В. Анализ уравнений, описывающих процесс внезапного выброса угля и газа // ЧММСС. Т. 11. № 4. 1980.
6. Казаков Ю.В., Федоров А.В., Фомин В.М. Расчет разлета сжатого облака газозвеси // ПМТФ. № 5. 1987.
7. T. Yabe. A universal solver for hyperbolic equations for cubic-polynomial interpolation I. One-dimensional solver // Computer Physics Communication. — 1991. — Vol. 66.
8. Федоров А.В., Федорченко И.А. Расчет подъема пыли за скользящей вдоль слоя ударной волной. Верификация модели // ФГВ. Т. 41. № 3. 2005.
9. Федоров А. В., Федорченко И.А. Численное моделирование распространения ударной волны в смеси газа и твердых частиц // ФГВ. Т. 46. № 5. 2010.
10. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., и др. Ударные волны при разлете сжатого объема газозвеси твердых частиц // ДАН СССР. Т. 281. № 5. 1985.