

Численное моделирование внезапного выброса угля и газа*

А.В. ФЕДОРОВ, И.А. ФЕДОРЧЕНКО

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
irina@itam.nsc.ru: 630090, Новосибирск, Институтская, 4/1

Методами моделирования механики гетерогенных сред (МГС) исследуется проблема внезапного выброса угля и газа в выработанное пространство шахты. Используется одномерный неравновесный по скоростям и температурам подход МГС с учетом межгранулярного взаимодействия частиц. Для аппроксимации уравнений адаптирован численный метод СР.

1. Математическая модель

В работе проводится исследование задачи о внезапном выбросе угля и газа в выработанное пространство. Модель явления основана на законах сохранения массы и импульса для каждой фазы, и дополняется уравнениями состояния для газа и межгранулярного давления. Межгранулярное давление характеризует процесс соударения твердых частиц. В качестве меры кинетической энергии соударения выступает гранулярная температура, которая является параметром задачи. Температура газа также считается постоянной.

В неконсервативном виде эта математическая модель записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} &= -\frac{m_1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f_{12}}{\rho_1} \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} &= -\frac{m_2}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_s}{\partial x} + \frac{f_{12}}{\rho_2} \end{aligned} \quad (1)$$

и дополняется уравнениями состояния

$$\begin{aligned} p &= \frac{a_1^2 \rho_1}{1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}} \\ p_s &= (\rho_2 + (1 + 2(1 + e)m_2 g_0)\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_i – средняя плотность, u_i – скорость, m_i – объемная концентрация i -ой фазы, $i = 1$ и 2 – газовая и твердая фазы, соответственно, p – давление газовой фазы, p_s –

*Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы Министерства образования и науки» на 2011 год, код проекта 2.1.1/11316 и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-393.2011.1.

межгранулярное давление, f_{12} – сила межфазного взаимодействия, определяемая по формуле $f_{12} = \frac{3}{8}C_D \frac{\rho_{11}m_2}{r_p}(u_1 - u_2)|u_1 - u_2|$, ρ_{11} – истинная (физическая) плотность газа, r_p – радиус частиц, C_D – коэффициент сопротивления, a_1 – скорость звука в чистом газе. Для расчета коэффициента сопротивления частиц использовалась трехдиапазонная формула, взятая по [1],

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

Функция радиального распределения вычисляется как $g_0 = [1 - (m_2/m_{2,max})^{1/3}]^{-1}$, e – коэффициент реституции, равный 0.995.

2. Метод решения

Для решения начально-краевой задачи о распространении волновых процессов в газозвезях на основе предложенной модели применялся СІР-метод [2]. 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 [3]–[4]. Результаты тестов были сопоставлены с имеющимися в литературе данными и показали хорошее соответствие всех параметров.

3. 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 . 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.

Разрыв располагается в точке $x = 0$, справа от него находится выработанное пространство. Будем трактовать его как камеру низкого давления (КНД). Слева от разрыва расположена каверна внезапного выброса, заполненная газозвезью, назовем ее камерой высокого давления (КВД). В общем случае она содержит метан и частицы угля. Для физического тестирования математической модели (1–2) рассмотрим КВД со смесью частиц угля и гелия, что соответствует имеющимся экспериментальными и расчетными данными [1],[5].

Т а б л и ц а 1. Начальные данные для решения задачи о внезапном выбросе.

Параметр	КВД	КНД
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	—

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

4. Результаты расчета

4.1. Немонотонность поведения скорости волны разрежения

В работе исследовано влияние гранулярного давления на параметры течения при высоких значениях загрузки потока частицами. На рис. 1, а представлены распределения давления газовой фазы на начальный момент времени (кривая $t = 0$) и при 330 мкс для умеренных значений концентрации частиц в КВД. В диапазоне невысоких значений концентрации ($m_2 = 0 \div 0.3$) 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. 1, б, где также показаны распределения давления на моменты времени $t = 0$ и 330 мкс для начальных концентраций частиц в слое 0.5 и 0.6. Таким образом, скорость распространения ВР внутри плотного слоя ведет себя немонотонно в зависимости 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

$$a_e^2 = \frac{\xi_1 a_1^2}{m_1^2} + \xi_2 \theta + 2\xi_2 m_2 \theta (1 + e) \left[2g_0 + \left(\frac{m_2}{m_{2,max}} \right)^{1/3} \frac{g_0^2}{3} \right] \quad (4)$$

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

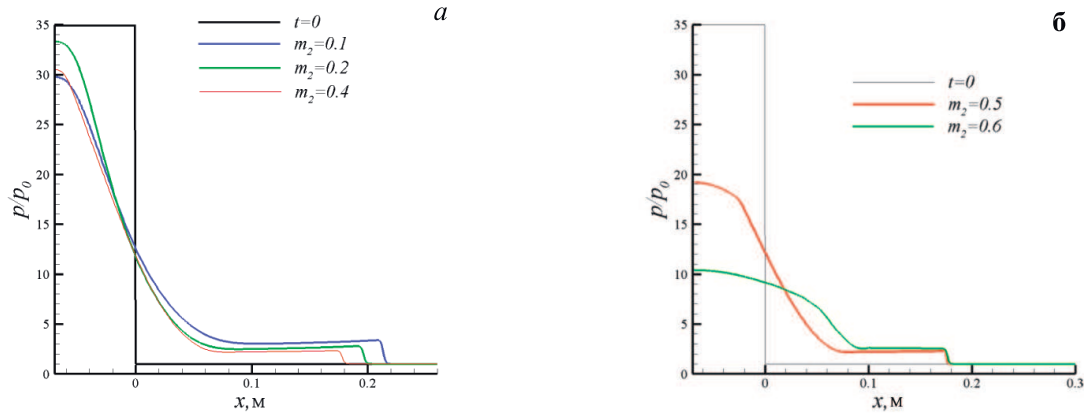


Рис. 1 Зависимость давления газовой фазы от объемной концентрации частиц

соответственно, что говорит о 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.

В диапазоне концентраций дисперсной фазы $0.4 \div 0.6$ равновесная скорость звука резко возрастает и имеет асимптоту при максимальной загрузке $m_{2,max} = 0.65$. Величина межгранулярного давления при этом становится бесконечно большой. 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 называть эту величину концентрации критической. 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 (рис. 1, б).

4.2. Анализ картины течения при различных концентрациях твердой фазы ($m_2 < m_{2,max}$).

На рис. 2, а приведено сопоставление картин распространения ВР для объемной концентрации частиц в КВД 0.5 (зеленые линии) и 0.6 (красные линии) на примере распределения объемной концентрации частиц (рис. 2, а) и давления газа (рис. 2, б) на более поздний период времени. На момент времени 700 мкс можно наблюдать, что фронт УВ в воздухе при $m_2 = 0.5$ отстает от УВ при $m_2 = 0.6$, т.е. происходит увеличение скорости скачка при росте плотности слоя. 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 вблизи “пробки” газоугольной смеси (зона А на рис. 2,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.

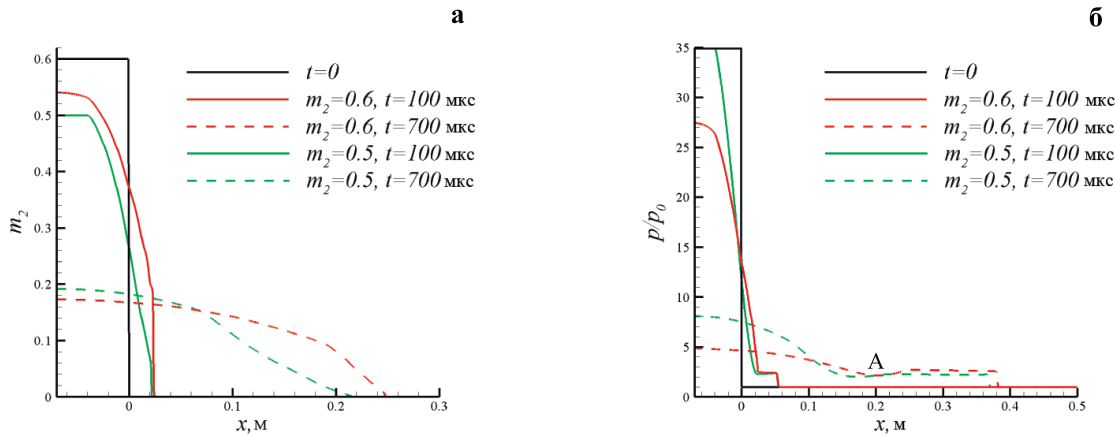


Рис. 2 Распределение объемной концентрации частиц (а) и давления газовой фазы (б) на разные моменты времени для двух начальных значений концентрации частиц

4.3. Влияние межгранулярного давления.

Рассмотрим, к чему приводит учет межгранулярного давления при расчете решаемой задачи. Сравнение распределений давления газовой фазы с учетом (красные линии) и без гранулярного давления (синие линии) на разные моменты времени (0, 110 и 330 мкс) на рис. 3, а 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. Как уже отмечалось, увеличение скорости волны разрежения объясняется резким ростом скорости звука в смеси при расчете по модели, учитывающей межгранулярное давление. Рост амплитуды УВ можно объяснить 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. 3, б). Линии, полученные при расчете частиц диаметром 20 мкм с учетом (красная кривая) и без учета (синяя кривая) p_s в изотермическом приближении демонстрируют вышеописанное свойство увеличения скорости фронта УВ при учете межгранулярного взаимодействия частиц. Для сравнения на данном рисунке также приведены расчеты [1] и экспериментальные данные [5]. Поведение кривых настоящего исследования и [1], [5] при фиксированной концентрации частиц согласуется между собой, в количественном отношении разница, вероятно, обусловлена учетом температурного фактора в модели [1].

Проведенный параметрический анализ влияния гранулярной температуры, характеризующей кинетику столкновений между частицами, позволил оценить ее влияние на картину течения. При увеличении значения данного параметра до 1000 и 5000 Дж/кг происходит рост амплитуды и скорости головной УВ. Скорость волны разрежения при распространении ее по смеси также увеличивается при фиксированной концентрации частиц, что можно объяснить увеличением равновесной скорости звука в смеси при увеличении гранулярной температуры, см. (4).

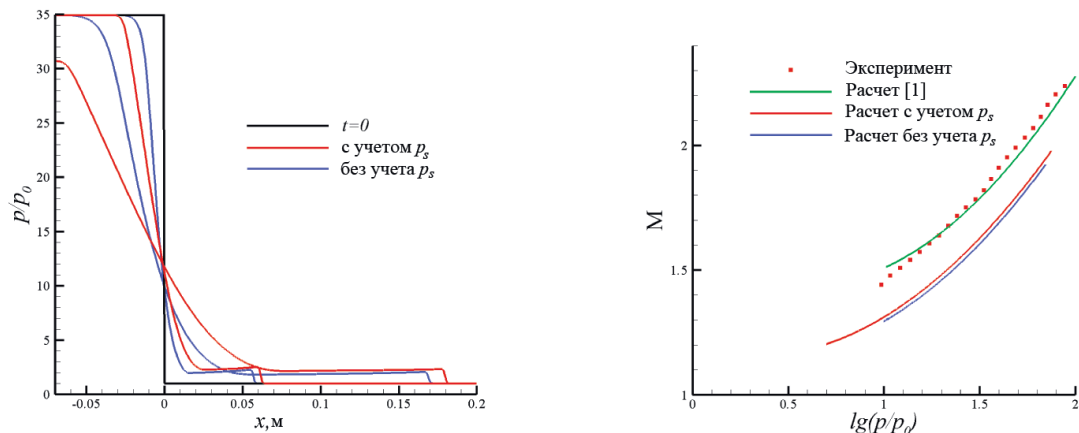


Рис. 3 Давление в газе с учетом и без учета межгранулярного давления при объемной концентрации 0.5 (а) и зависимость числа Маха УВ от начального отношения давления на разрыве (б)

5. Заключение

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

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 слоя после прохождения волны разрежения.

Список литературы

- [1] Казаков Ю.В., Федоров А.В., Фомин В.М. Расчет разлета сжатого облака газозвеси // ПМТФ. 1987. № 5.
- [2] T. YABE A universal solver for hyperbolic equations for cubic-polynomial interpolation I. One-dimensional solver // Computer Physics Communication. 1991. Vol. 66.
- [3] Федоров А.В., Федорченко И.А. Расчет подъема пыли за скользящей вдоль слоя ударной волной. Верификация модели // ФГВ. 2005. Т. 41. № 3.
- [4] Федоров А.В., Федорченко И.А. Численное моделирование распространения ударной волны в смеси газа и твердых частиц // ФГВ. 2010. Т. 46. № 5.
- [5] Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., и др. Ударные волны при разлете сжатого объема газозвеси твердых частиц // ДАН СССР. 1985. Т. 281. № 5.