

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Т.А. Хмель, А.В. Федоров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Введение. Задачи взаимодействия ударных волн (УВ) с пылевыми слоями возникают в связи с проблемами подавления или предотвращения детонации в реагирующих средах. Одним из способов гашения очагов горения является взрывное диспергирование оболочки инертных частиц под действием центрального заряда. Описание динамики плотных слоев частиц требует учета столкновительной динамики частиц. В [1-2] развита физико-математическая модель двухфазной среды типа газ – несжимаемые частицы, в которой для описания столкновений в рамках континуальной механики привлекаются молекулярно-кинетические подходы теории гранулированных материалов. Численная технология расчетов основана на применении схем класса TVD (схема Хартена для газа и схема Джентри-Мартина-Дэйли для частиц) с аналогичными аппроксимациями дополнительных неконсервативных членов в уравнениях для конечных объемных концентраций частиц (влияние сил плавучести). Рассматриваются задачи взаимодействия ударных волн со слоями пыли, формирующими оболочку.

Основные уравнения. Детальное изложение модели представлено в [2]. Уравнения Эйлера вытекают из законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой из компонент смеси. Столкновения частиц интегрально описываются посредством включения дополнительных слагаемых в давление в фазе частиц $m_2 p_2 = m_2 p_1 + p_c$ и полную энергию $E_2 = e_c + c_{v2} T_2 + (u_2^2 + v_2^2) / 2$. Связь между столкновительным давлением и энергией хаотического движения частиц имеет вид: $p_c = 0.5 \alpha_t [1 + 2(1 + \varepsilon) m_2 g(m_2)] \rho_2 e_c$, $g(m_2) = [1 - (m_2 / m_*)^{4m_2/3}]^{-1}$, m_* - предельная объемная концентрация частиц при плотной упаковке. Уравнение баланса энергии хаотического движения $E_c = e_c + 0.5 \eta u_2^2$ получено в форме

$$\frac{\partial \rho_2 E_c}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 u_2 E_c + \eta m_2 u_2 p_2)}{\partial x} = \eta p_1 \frac{\partial u_2 m_2}{\partial x} - I_0 + \eta f u_2, \quad (1)$$

$$I_0 = \frac{6}{\pi d_2} C_0 \rho_2 m_2 g(m_2) (e_c^{3/2} - e_{c0}^{3/2})$$

Зависимости α_t , η и C_0 от параметров реституции ε и шероховатости β приведены в [2], параметр e_{c0} задается. Отметим, что при достижении предельных значений объемной концентрации частиц m_* функция $g(m_2)$ неограниченно возрастает. В численных расчетах задавалось некоторое предельное значение, ограничивающее давление (скорость звука в фазе частиц ограничена скоростью звука в твердом материале). Верификация и валидация модели проводилась по экспериментальным данным Гельфанда Б.Е. и др. по зависимости скорости переднего фронта волны разрежения (равновесной скорости звука) в газозвеси от давления и размера частиц и данным [3] по взаимодействию УВ со слоем частиц на плоской поверхности.

© Т.А. Хмель, А.В. Федоров, 2015

Результаты расчетов. Задача о разлете газозвеси при воздействии расширяющейся УВ рассматривается как в одномерной постановке (в приближении сферической симметрии), так и в двумерной (воздействие цилиндрической УВ на цилиндрическую оболочку частиц). На рис. 1а приведены характерные расчетные картины разлета пылевзвеси при взрыве центрального заряда в сферической постановке. Представлены траектории движения фронта лидирующей УВ и передней границы облака. Эти картины соответствуют наблюдениям границ основного облака частиц в различные моменты времени, однако в экспериментах [4] отмечается более быстрый разлет крупных агломератов с возможным опережением фронта лидирующей ударной волны. На рис. 1б показаны распределения плотности частиц (сплошные линии) и столкновительного давления (штриховые линии) на начальной стадии взаимодействия фронта ударной волны с облаком частиц. Как видно, столкновительное давление может достигать значительных величин в областях, где плотность частиц достигает предельных значений плотной упаковки, что, очевидно, способствует процессу агломерации частиц.

Результаты расчетов в двумерной постановке показаны на рис. 2. Представлены картины взаимодействия цилиндрической ударной волны со слоем частиц, характеризующимся неровностью внешней поверхности (волнистостью). Амплитуда ударной волны характеризовалась значениями числа Маха от 3 до 5, начальная плотность частиц 200 кг/м^3 , начальная энергия столкновений полагалась равной нулю. Форма поверхности показана на рис. 2а. В процессе разлета оболочки под воздействием УВ происходит диспергирование частиц (рис. 2б). Можно отметить два фактора диспергирования: развитие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова (увеличение высоты «зубцов» на рис. 2б) и влияние столкновительной динамики частиц (размазывание поверхности на рис. 2б). Развитие столкновительной динамики частиц характеризуется значениями столкновительного давления порядка 0.01 МПа , распределение которого соответствует распределению плотности частиц. Отметим, что развитие хаотического движения и столкновений частиц в некоторой степени подавляет развитие неустойчивости.

Влияние начальной энергии хаотического движения на картины разлета оболочки показаны на рис. 3. При значительной величине средней скорости пульсаций при движении частиц ($40 - 50 \text{ м/сек}$) их столкновения приводят к значительному диспергированию облака частиц (рис. 3с). Хотя картина на рис. 3с имеет некоторое подобие с картинами, наблюдаемыми в экспериментах [4], для полного соответствия необходимо учитывать другие факторы, в частности, процессы агломерации.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-08-00110).

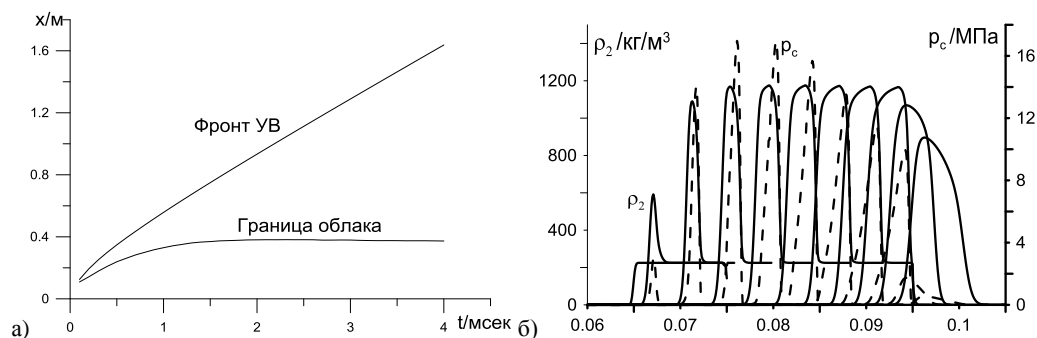


Рис. 1. Движение облака пылевзвеси при сферическом взрыве.

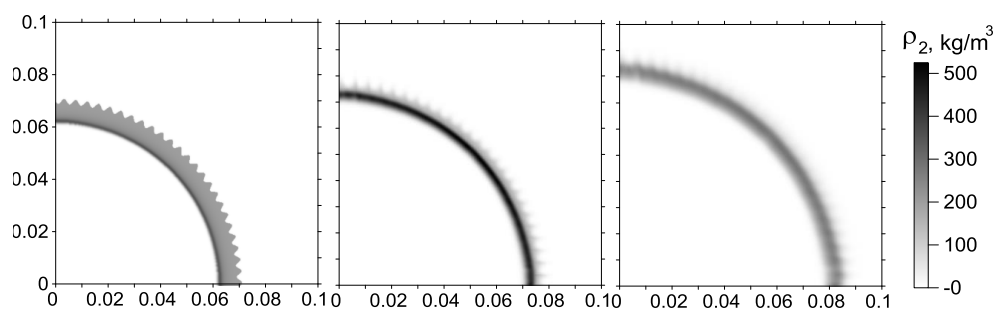


Рис. 2 Динамика разлета оболочки частиц с волнистой поверхностью: $t=0.04, 0.2$ и 0.32 мс.

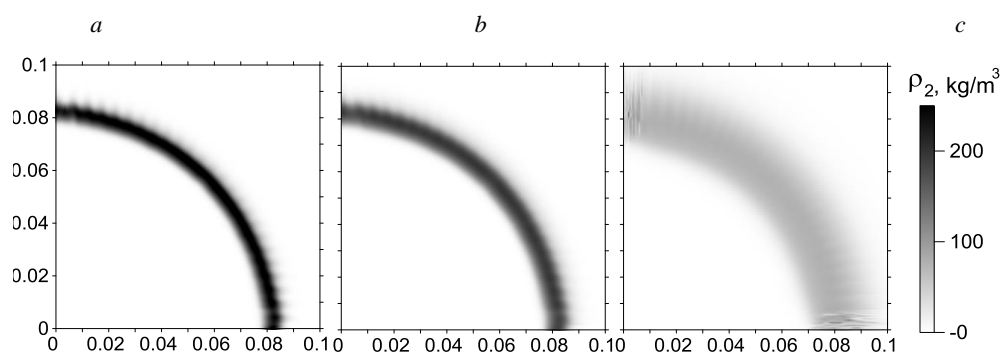


Рис. 3 Влияние столкновений на разлет оболочки частиц, $t=0.32$ мс:

$e_{c0}=0$ (a); $0.0001 \text{ м}^2/\text{мс}^2$ (b); $0.001 \text{ м}^2/\text{мс}^2$ (c).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fedorov A.V., Khmel T.A.** Description of Shock Wave Processes in Gas Suspensions Using the Molecular-Kinetic Collisional Model // Heat Transfer Research. 2012. Vol. 43, N 2. P. 95-107.
2. **Хмель Т.А., Федоров А.В.** Описание динамических процессов в газовзвесьях с привлечением молекулярно-кинетических подходов для учета межчастичных столкновений // ФГВ. 2014, № 2. С. 81-93.
3. **Fan, B.C., Chen, Z.H., Jiang, X.H., Li, H.Z.** Interaction of a shock wave with a loose dusty bulk layer // Shock Waves. 2007. Vol. 16. P. 179-187.
4. **Grégoire Y., Sturtzer M.-O., Khasainov B. A., Veysière-B.** Cinematographic investigations of the explosively driven dispersion and ignition of solid particles // Shock Waves. 2014. Vol. 24. P. 393-402.