

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОРМАЛЬНО ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЕМ ЧАСТИЦ В РАМКАХ УРАВНЕНИЙ БАЕРА–НУНЦИАТО*

Я. Э. Порошина¹, П. С. Уткин²

Аннотация: Представлены результаты численного моделирования эксперимента по взаимодействию ударной волны (УВ) со слоем частиц, насыпанным на непроницаемую стенку. Математическая модель основана на системе уравнений Баера–Нунциато (БН) и учитывает эффект компактирования твердой фазы частиц. Вычислительный алгоритм основан на методе Годунова с процедурой релаксации давления для устойчивого расчета явных межфазных границ. Вид кривой давления на стенке под слоем частиц объяснен с точки зрения реализующихся волновых процессов в слое. Проведено количественно сопоставление экспериментальной и рассчитанной кривой давления. Проведены параметрические исследования влияния параметров в законе компактирования на результаты моделирования. Результаты моделирования количественно сопоставлены с расчетами других авторов, выполненными с использованием уравнений Р. И. Нигматулина. Обсуждаются отличия в результатах при использовании двух моделей течения двухфазных сред.

Ключевые слова: ударная волна; волна компактирования; слой частиц; уравнения Баера–Нунциато; метод Годунова; релаксация давления; численное моделирование

DOI: 10.30826/CE20130109

Литература

1. *Lebecki K.* 2010. Underground mine explosions — past, present, future // 8th Symposium (International) on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosion Proceedings. — Yokohama, Japan, 2010. Paper Plenary-4.
2. *Gelfand B. E., Medvedev S. P., Borisov A. A., Polenov A. N., Frolov S. M., Tsyganov S. A.* Shock loading of stratified dusty systems // *Archivum Combustionis*, 1989. Vol. 9. No. 4. P. 153–165.
3. *Baer M. R., Nunziato J. W.* A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition in reactive granular materials // *Int. J. Multiphas. Flow*, 1986. Vol. 12. No. 6. P. 861–889. doi: 10.1016/0301-9322(86)90033-9.
4. *Кутушев А. Г., Рудаков Д. А.* Численное исследование воздействия ударной волны на преграду, экранируемую слоем пористой порошкообразной среды // *Прикладная механика и техническая физика*, 1993. Т. 5. С. 25–31.
5. *Федоров А. В., Федорченко И. А.* Расчет подъема пыли за скользящей вдоль слоя ударной волной. Верификация модели // *Физика горения и взрыва*, 2005. Т. 41. № 3. С. 110–120.
6. *Нигматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. Часть I. — Москва: Наука, 1987. 464 с.
7. *Britain A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P.* Mechanism of compressive formation during weak shock waves impact with granular materials // *Exp. Fluids*, 1997. Vol. 22. P. 507–518. doi: 10.1007/s003480050078.
8. *Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н., Урманчиев С. Ф.* Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном // *Физика горения и взрыва*, 2000. Т. 36. № 4. С. 87–96.
9. *Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н., Урманчиев С. Ф.* Воздействие воздушных ударных волн на преграды, покрытые пористым слоем // *Вычислительные технологии*, 2001. Т. 6. № 3. С. 7–20.
10. *Gidaspow D.* Multiphase flow and fluidization. — Academic Press, 1994. 467 p.
11. *Хмель Т. А., Федоров А. В.* Описание динамических процессов в двухфазных столкновительных средах с привлечением молекулярно-кинетических подходов // *Физика горения и взрыва*, 2014. Т. 50. № 2. С. 81–93.
12. *Хмель Т. А., Федоров А. В.* Моделирование распространения ударных и детонационных волн в запыленных средах при учете межчастичных столкновений // *Физика горения и взрыва*, 2014. Т. 50. № 5. С. 53–62.
13. *Houim R. W., Oran E. S.* A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: Formulation and initial tests // *J. Fluid Mech.*, 2016. Vol. 789. P. 166–220. doi: 10.1017/jfm.2015.728.
14. *Saurel R., Abrall R.* A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows // *J. Comput. Phys.*, 1999. Vol. 150. P. 425–467. doi: 10.1006/jcph.1999.6187.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

¹Московский физико-технический институт, poroshina@phystech.edu

²Институт автоматизации проектирования РАН, pavel_utk@mail.ru

15. *Bdzil J. B., Menikoff R., Son S. F., Kapila A. K., Stewart D. S.* Two-phase modeling of deflagration-to-detonation transition in granular materials: A critical examination of modeling issues // *Phys. Fluids*, 1999. Vol. 11. No. 2. P. 378–402. doi: 10.1063/1.869887.
16. *Schwendeman D. W., Wahle C. W., Kapila A. K.* A study of detonation evolution and structure for a model of compressible two-phase reactive flow // *Combust. Theor. Model.*, 2008. Vol. 12. No. 1. P. 159–204. doi: 10.1080/13647830701564538.
17. *Уткин П. С.* 2017. Математическое моделирование взаимодействия ударной волны с плотной засыпкой частиц в рамках двухжидкостного подхода // *Хим. физика*, 2017. Т. 36. № 11. С. 61–71. doi: 10.7868/S0207401X17090151.
18. *Уткин П. С.* Некоторые вычислительные аспекты моделирования взаимодействия ударной волны с облаком частиц в рамках двухжидкостной модели // *Горение и взрыв*, 2017. Т. 10. № 3. С. 53–57.
19. *Rogue X., Rodriguez G., Haas J. F., Saurel R.* Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed // *Shock Waves*, 1998. Vol. 8. P. 29–45. doi: 10.1007/s001930050096.
20. *Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. 400 с.
21. *Моисеев Н. Я., Мухамадиева Т. А.* Метод Ньютона для решения задачи о распаде произвольного разрыва в средах с уравнением состояния общего вида // *Ж. вычисл. мат. мат. физ.*, 2008. Т. 48. № 6. С. 1102–1110.
22. *Saurel R., Favrie N., Petitpas F., Lallemand M.-H., Gavrilyuk S. L.* Modelling dynamic and irreversible powder compaction // *J. Fluid Mech.*, 2010. Vol. 664. P. 348–396. doi: 10.1017/S0022112010003794.
23. *Strang G.* On the construction and comparison of difference schemes // *SIAM J. Numer. Anal.*, 1968. Vol. 5. No. 3. P. 506–517. doi: 10.1137/0705041.
24. *Schwendeman D. W., Wahle C. W., Kapila A. K.* The Riemann problem and high-resolution Godunov method for a model of compressible two-phase flow // *J. Comput. Phys.*, 2006. Vol. 212. P. 490–526. doi: 10.1016/j.jcp.2005.07.012.
25. *Utkin P.* Numerical simulation of shock wave – dense particles cloud interaction using Godunov solver for Baer–Nunziato equations // *Int. J. Numer. Method. H.*, 2019. Vol. 29. No. 9. P. 3225–3241. doi: 10.1108/HFF-10-2018-0587.
26. *Poroshyna Y., Utkin P.* Pressure relaxation procedure with compaction for the problems of shock wave – particles beds interaction // *32nd Symposium (International) on Shock Waves Proceedings*. — Singapore, 2019. OR-14-0254:1649–1656. doi: 10.3850/978-981-11-2730-4_0254-cd.
27. *Khishchenko K. V., Lomonosov I. V., Fortov V. E.* Equations of state for organic compounds over wide range of densities and pressures // *AIP Conf. Proc.*, 1996. Vol. 370. P. 125–128. doi: 10.1063/1.50728.
28. *Кикоин И. К.* Таблицы физических величин. — Москва: Атомиздат, 1976. 1008 с.
29. *Simha R., Wilson P. S., and Olabisi O.* Pressure–volume–temperature properties of amorphous polymers: Empirical and theoretical predictions // *Kolloid Z. Z. Polym.*, 1973. Vol. 251. No. 6. P. 402–408. doi: 10.1007/BF01498686.

Поступила в редакцию 16.11.2019