

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НАД ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ЧАСТИЦ В РАМКАХ УРАВНЕНИЙ БАЕРА–НУНЦИАТО*

П. А. Чупров¹, Я. Э. Порошина², П. С. Уткин³

Аннотация: Представлены результаты численного моделирования экспериментов, в которых ударная волна (УВ) различной интенсивности распространялась над поверхностью плотного слоя частиц, насыщенного на непроницаемую стенку. Математическая модель основана на двумерной системе уравнений Баера–Нунциато (БН) и учитывает межгранулярные напряжения, возникающие в твердой фазе частиц. Вычислительный алгоритм основан на методе HLLC с процедурой мгновенной релаксации давления. Разработанный алгоритм работоспособен при наличии сильных разрывов объемной доли частиц, типичных для двухфазных ударно-волновых задач, связанных с засыпкой, облаком или слоем частиц, в том числе для локально сверхзвуковых режимов течения газа. Проведено качественное и количественное сравнение полученных результатов с опытными данными и расчетами других авторов.

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

DOI: 10.30826/CE22150206

EDN: NOEVES

Литература

1. Хомик С. В., Гук И. В., Иванцов А. Н., Медведев С. П., Андержанов Э. К., Михайлин А. И., Сильников М. В., Тереза А. М. Моделирование взаимодействия сферической ударной волны со слоем насыпного материала в конической ударной трубе // Хим. физика, 2021. Т. 40. № 8. С. 63–69. doi: 10.31857/S0207401X21080045.
2. Sugiyama Y., Homae T., Matsumura T., Wakabayashi K. Numerical study on the mitigation effect of glass particles filling a partially confined space on a blast wave // Int. J. Multiphas. Flow, 2021. Vol. 136. P. 103546. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103546.
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. Furfaro D., Saurel R. A simple HLLC-type Riemann solver for compressible non-equilibrium two-phase flows // Comput. Fluids, 2015. Vol. 111. P. 159–178. doi: 10.1016/j.compfluid.2015.01.016.
5. Gelfand B. E., Medvedev S. P., Borisov A. A., Polenov A. N., Frolov S. M., Tsyganov S. A. 1989. Shock loading of stratified dusty systems // Archivum Combustionis, 1989. Vol. 9. No. 4. P. 153–165.
6. 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. doi: 10.1007/s00193-006-0059-5.
7. Khmel' T. A., Fedorov A. V. Numerical simulation of dust dispersion using molecular-kinetic model for description of particle-to-particle collisions // J. Loss Prevent. Proc., 2015. Vol. 36. P. 223–229. doi: 10.1016/j.jlp.2015.02.006.
8. Houim R., Oran E. 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.
9. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization. — Academic Press, 1994. 467 p.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Poroshyna Ya. E., Utkin P. S. Numerical simulation of a normally incident shock wave – dense particles layer interaction using the Godunov solver for the Baer–Nunziato equations // Int. J. Multiphas. Flow, 2021. Vol. 142. P. 103718. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103718.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

¹ Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, petchu@mail.ru

² Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, poroshina@phystech.edu

³ Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, pavel_utk@mail.ru

14. *Уткин П. С.* 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.
15. *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.
16. *Saurel R., Favrie N., Petitpas F., Lallemand M.-H., Gavriluk S. L.* Modelling dynamic and irreversible powder compaction // *J. Fluid Mech.*, 2010. Vol. 664. P. 348–396. doi: 10.1017/S0022112010003794.
17. *Chuprov P., Utkin P., Fortova S.* Numerical simulation of a high-speed impact of metal plates using a three-fluid model // *Metals* — Basel, 2021. Vol. 11. No. 8. P. 1233. doi: 10.3390/met11081233.
18. *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.
19. *Woodward P., Colella P.* The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks // *J. Comput. Phys.*, 1984. Vol. 54. P. 115. doi: 10.1016/0021-9991(84)90142-6.
20. *Quirk J. J.* A contribution to the great Riemann solver debate // *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, 1994. Vol. 18. No. 6. P. 555. doi: 10.1002/fld.1650180603.

Поступила в редакцию 14.02.2022