

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА HLL ДЛЯ УРАВНЕНИЙ БАЕРА–НУНЦИАТО*

П. С. Уткин¹, Я. Э. Порошина²

Аннотация: Разработана программа и проведены вычислительные эксперименты по инициированию и распространению детонационной волны (ДВ) в гетерогенной реагирующей среде. Математическая модель основана на системе уравнений Баера–Нунциато (БН) с модификациями Bdzil с соавт. (1999). Модель учитывает компактирование конденсированной фазы, обмен массой, а также импульсом и энергией между газовой и конденсированной фазами, в том числе из-за наличия локального градиента объемной доли конденсированной фазы (так называемые сопловые эффекты). Вычислительный алгоритм основан на методе Harten – Lax – van Leer (HLL). Численно исследованы два режима распространения детонации — с волной компактирования, предшествующей волне реакций, и без волны компактирования. Данные режимы зависят от интенсивности протекания химических реакций. Результаты вычислительных экспериментов сопоставлены с результатами расчетов Schwendeman с соавторами (2008), выполненных методом Годунова.

Ключевые слова: гетерогенная детонация; волна компактирования; уравнения Баера–Нунциато; метод HLL; численное моделирование

DOI: 10.30826/CE19120110

Литература

1. 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. 21. No. 26. P. 861–889. doi: 10.1016/0301-9322(86)90033-9.
2. Embid P., Baer M. Mathematical analysis of a two-phase continuum mixture theory // *Continuum Mech. Therm.*, 1992. Vol. 4. P. 279–312. doi: 10.1007/BF01129333.
3. Saurel R., Abgrall 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.
4. 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.
5. Tokareva S. A., Toro E. F. HLLC-type Riemann solver for the Baer–Nunziato equations of compressible two-phase flow // *J. Comput. Phys.*, 2010. Vol. 229. P. 3573–3604. doi: 10.1016/j.jcp.2010.01.016.
6. 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.
7. Lochon H., Daude F., Galon P., Herard J. M. 2016. HLLC-type Riemann solver with approximated two-phase contact for the computation of the Baer–Nunziato two-fluid model // *J. Comput. Phys.*, 2016. Vol. 326. P. 733–762. doi: 10.1016/j.jcp.2016.09.015.
8. Dumbser M., Balsara D. S. A new efficient formulation of the HLLEM Riemann solver for general conservative and non-conservative hyperbolic systems // *J. Comput. Phys.*, 2016. Vol. 304. P. 275–319. doi: 10.1016/j.jcp.2015.10.014.
9. Menshov I., Serezhkin A. A generalized Rusanov method for the Baer–Nunziato equations with application to DDT processes in condensed porous explosives // *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, 2018. Vol. 86. P. 346–364. doi: 10.1002/flid.4419.
10. 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.
11. 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.
12. Abgrall R. How to prevent pressure oscillations in multicomponent flow calculations: A quasi conservative approach // *J. Comput. Phys.*, 1996. Vol. 125. P. 150–160. doi: 10.1006/jcph.1996.0085.
13. Уткин П. С. Математическое моделирование взаимодействия ударной волны с плотной засыпкой

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

¹ Институт автоматизации проектирования РАН; Московский физико-технический институт, pavel_utk@mail.ru

² Московский физико-технический институт, poroshina@phystech.edu

- частиц в рамках двухжидкостного подхода // Хим. физика, 2017. Т. 36. № 11. С. 61–71. doi: 10.7868/S0207401X17090151.
14. Уткин П. С. Годуновский солвер для решения системы уравнений Баера–Нунциато для описания течений двухфазных сжимаемых сред // Горение и взрыв, 2014. Вып. 7. С. 187–190.

Поступила в редакцию 25.12.18