

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЛАГРАЦИИ ПОРОХА В РАМКАХ МОДЕЛИ БАЕРА–НУНЦИАТО\*

П. А. Чупров<sup>1</sup>, Я. Э. Порошина<sup>2</sup>, П. С. Уткин<sup>3</sup>

**Аннотация:** Работа посвящена исследованию особенностей применения гиперболической модели Баера–Нунциато (БН) для численного моделирования распространения волны дефлаграции по заряду дымного ружейного пороха (ДРП). Хотя уравнения БН уже долгое время применяются для моделирования горения и детонации гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ), существуют единичные работы, в которых данная модель применяется для порохов. Модель учитывает эффекты компактирования конденсированной фазы (к-фазы) пороха. Вычислительный алгоритм основан на методе Harten – Lax – van Leer (HLL), важным элементом является процедура релаксации давления для обеспечения условия локального равновесия межфазных границ с учетом межгранулярных напряжений. Постановка задачи соответствует натурному опыту Б. С. Ермолаева с соавторами. В расчетах получена корректная волновая структура процесса, включающая лидирующую волну компактирования, следующую за ней волну горения, отраженные от торцов канала волны. Представлено объяснение вида кривых давления на датчиках с точки зрения реализующегося течения в рамках рассматриваемой модели. Проведено сравнение полученных кривых давления на датчиках и пространственных распределений параметров течения с расчетными результатами Б. С. Ермолаева с соавторами.

**Ключевые слова:** численное моделирование; уравнения Баера–Нунциато; порох; внутренняя баллистика; компактирование; численный метод Harten – Lax – van Leer

**DOI:** 10.30826/CE20130309

### Литература

1. Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
2. Русяк И. Г., Ушаков В. М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 259 с.
3. Koo K. K., J. H. Kuo, T. R. Davis, G. R. Coates. Transient combustion in mobile gas-permeable propellants // *Acta Astronaut.*, 1976. Vol. 3. P. 573–559. doi: 10.1016/0094-5765(76)90163-6.
4. Gallouet T., Helluy P., Herard J.-M., Nussbaum J. Hyperbolic relaxation models for granular flows // *ESAIM Math. Model. Num.*, 2010. Vol. 44. P. 371–400. doi: 10.1051/m2an/2010006.
5. Ахатов И. Ш., Вайнштейн П. Б. Нестационарные режимы горения пористых порохов // *Физика горения и взрыва*, 1983. Т. 3. С. 53–61.
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. Ч. I. 464 с.
7. 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.
8. Sen O., Rai N. K., Diggs A. S., Hardin D. B., Udaykumar H. S. Multi-scale shock-to-detonation simulation of pressed energetic material: A meso-informed ignition and growth model // *J. Appl. Phys.*, 2018. Vol. 124. P. 085110. doi: 10.1063/1.5046185.
9. Longuet B., Pieta P. D., Franco P., Legeret G., Papy A., Boisson D., Reynaud C., Millet P., Taiana E., Carrere A. MOBIDIC-NG: A 1D/2D CFD code suitable for interior ballistics and vulnerability modelling // *22nd Symposium (International) on Ballistics Proceedings*. — Vancouver, Canada, 2005. P. 362–371.
10. Nissbaum J., Helluy P., Herard J.-M., Baschung B. Multi-dimensional two-phase flow modeling applied to interior ballistics // *J. Appl. Mech.*, 2012. Vol. 78. P. 051016. doi: 10.1115/1.4004293.
11. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Фотеенков В. А., Храповский В. Е., Коротков А. И., Борисов А. А. Природа и закономерности квазистационарного пульсирующего конвективного горения // *Физика горения и взрыва*, 1980. Т. 16. № 3. С. 24–34.
12. Фотеенков В. А., Коротков А. И., Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. Распространение конвективного горения в зарядах насыпной плотности // *Физика горения и взрыва*, 1982. Т. 18. № 2. С. 137–139.
13. Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Викторов С. Б., Слеп-

\*Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт; Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, petchu@mail.ru

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, poroshina@phystech.edu

<sup>3</sup>Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, pavel\_utk@mail.ru

- цов К. А., Жарикова С. Ю. Неидеальные режимы дефлаграции и детонации дымного пороха // Хим. физика, 2010. Т. 29. № 5. С. 1–13.
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.
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. 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. 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.
19. Порошина Я. Э., Уткин П. С. Численное моделирование взаимодействия нормально падающей ударной волны со слоем частиц в рамках уравнений Баера–Нунциато // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 1. С. 95–104. doi: 10.30826/CE20130109.
20. 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.
21. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
22. Le Metayer O., Saurel R. The Noble–Abel stiffened gas equation of state // Phys. Fluids, 2016. Vol. 28. P. 046102. doi: 10.1063/1.4945981.
23. Radulescu M. I. On the Noble–Abel stiffened-gas equation of state // Phys. Fluids, 2019. Vol. 31. P. 111702. doi: 10.1063/1.5129139.
24. Фролов С. М., Сметанюк В. А. Тепло- и массообмен капли с газовым потоком // Хим. физика, 2006. Т. 25. № 4. С. 42–54.
25. Уткин П. С., Порошина Я. Э. Численное моделирование гетерогенной детонации с использованием метода HLL для уравнений Баера–Нунциато // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 84–89. doi: 10.30826/CE19120110.
26. 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.
27. 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. Vol. OR-14-0254. P. 1649–1656. doi: 10.3850/978-981-11-2730-4\_0254-cd.
28. Семенов И. В., Уткин П. С., Ахмедьянов И. Ф., Меньшов И. С. Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики // Вычислительные методы и программирование, 2011. Т. 12. № 1. С. 183–193.
29. Шиллинг Н. А. Курс дымных порохов. — М.: ГИОП, 1940. 155 с.
30. 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.
31. Меньшов И. С., Немцев М. Ю., Семенов И. В. Численное моделирование волновых процессов при горении неоднородно распределенного заряда // Ж. вычисл. мат. мат. физ., 2019. Т. 59. № 9. С. 1591–1604. doi: 10.1134/S004446691909014X.
32. Ozisik Necati M. Heat conduction. — 2nd ed. — John Wiley & Sons, 1993. 692 p.
33. Nusca, M. J., Controy P. J. Multiphase CFD simulations of solid propellant combustion in gun systems // DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference Proceedings. — Biloxi, MS, 2001.

Поступила в редакцию 12.08.2020