

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ПОРОХА С УЧЕТОМ ЕГО СЖИМАЕМОСТИ*

П. С. Уткин¹, П. А. Чупров²

Аннотация: В большинстве стандартных моделей горения порохов, которые широко используются при решении задач внутренней баллистики ствольных систем и твердотопливных двигателей, порох считается несжимаемым. Данное предположение обосновано характерным диапазоном давлений в этих задачах. Однако для ряда приложений в области взрывобезопасности и энергетики интерес представляют неклассические режимы горения порохов, такие как конвективное горение и низкоскоростная детонация. Эти режимы характеризуются повышенными давлениями, при которых сжимаемость энергетического материала становится существенной. Настоящая работа посвящена моделированию горения пороха в манометрической бомбе с использованием уравнений Баера–Нунциато. Данная двухфазная модель предполагает сжимаемость газовой и конденсированной фаз, а также неравновесность по давлениям фаз. Предложены три модификации к общепринятой модели горения пороха: (1) поправка теплового эффекта горения пороха на внутреннюю энергию конденсированной фазы; (2) дополнительный член в уравнении для изменения относительной толщины горящего свода, учитывающий сжимаемость пороха; (3) процедура коррекции коэффициента в законе горения, обеспечивающая соответствие импульса конца горения экспериментальным данным. Данные модификации валидированы при рассмотрении горения навески из одноканального пироксилинового пороха в манометрической бомбе.

Ключевые слова: порох; термодинамическая модель; геометрический закон горения; уравнения Баера–Нунциато; сжимаемость

DOI: 10.30826/CE25180110

EDN: DYMQXV

Литература

1. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
2. Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Наука, 1967. 368 с.
3. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйков С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973. 292 с.
4. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Романьков А. В., Храповский В. Е. Конвективное горение: от взрывобезопасности к использованию в импульсных технических устройствах // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 4. С. 96–115.
5. Дьячковский А. С., Рогаев К. С., Ищенко А. Н., Самоорова Н. М., Сидоров А. Д., Степанов Е. Ю., Кодякова А. Д. Исследование особенностей горения высокоплотных топлив в условиях сопловой установки // Вестник Томского государственного университета, 2023. Т. 84. С. 109–122. doi: 10.17223/19988621/84/9.
6. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2017. 400 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. 12. No. 6. P. 861–889. doi: 10.1016/0301-9322(86)90033-9.
8. Corner J. Theory of the interior ballistics of guns. — John Wiley, 1950. 443 p.
9. Русак И. Г., Ушаков В. М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 259 с.
10. Прохницкий Л. А. Модель детонации твердых взрывчатых веществ по гомогенному механизму превращений // Физика горения и взрыва, 2003. Т. 39. № 2. С. 97–104.
11. Чупров П. А., Порошина Я. Э., Уткин П. С. Численное исследование дефлаграции пороха в рамках модели Баера–Нунциато // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 3. С. 91–106. doi: 10.30826/CE20130309.
12. 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.
13. 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.

*Исследование П. А. Чупрова выполнено в рамках государственного задания Института автоматизации проектирования Российской академии наук, номер государственной регистрации 124022400174-3.

¹Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай, utkin@hit.edu.cn

²Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, petchu@mail.ru

14. 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.
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. Kapila A. K., Menikoff R., Bdzil J. B., Son S. F., Stewart D. S. Two-phase modeling of deflagration to-detonation transition in granular materials: Reduced equations // Phys. Fluids, 2001. Vol. 13. P. 3002–3024. doi: 10.1063/1.1398042.
17. 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.
18. Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
19. Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Сулимов А. А. Численное моделирование перехода горения в детонацию в пироксилиновых порохах // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 1. С. 62–72.
20. Смирнов Н. Н., Зверев И. Н. Гетерогенное горение. — М.: Изд-во МГУ, 1992. 446 с.
21. Saurel R., Frayssé F., Furfaro D., Lapebie E. Multiscale multiphase modeling of detonations in condensed energetic materials // Comput. Fluids, 2017. Vol. 159. P. 95–111. doi: 10.1016/j.compfluid.2017.09.006.
22. Hennessey M., Kapila A. K., Schwendeman D. W. An HLLC-type Riemann solver and high-resolution Godunov method for a two-phase model of reactive flow with general equations of state // J. Comput. Phys., 2020. Vol. 405. P. 109180. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109180.
23. 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.
24. Gambino J. R., Schwendeman D. W., Kapila A. K. Numerical study of multiscale compaction-initiated detonation // Shock Waves, 2019. Vol. 29. P. 193–219. doi: 10.1007/s00193-018-0805-5.
25. Powers J. M. Theory of detonation structure for two-phase materials: PhD Diss. — University of Illinois at Urbana-Champaign, 1988. 125 p.
26. Elizabeth A. R., Sarma S., Jayachandran T., Ramakrishna P. A., Borthakur M. Comparative study of numerical schemes for granular combustion of boron potassium nitrate // Aerospace, 2024. Vol. 11. No. 4. P. 251. doi: 10.3390/aerospace11040251.
27. 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.
28. Utkin P. S., Chuprov P. A. Numerical simulation of shock wave propagation over a dense particle layer using the Baer–Nunziato model // Phys. Fluids, 2023. Vol. 35. P. 113313. doi: 10.1063/5.0172796.
29. Уткин П. С., Чупров П. А. Численное моделирование распространения зондирующих импульсов в плотной засыпке гранулированной среды // Компьютерные исследования и моделирование, 2024. Т. 16. № 6. С. 1361–1384. doi: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1361-1384.
30. Ищенко А. Н., Крайнов А. Ю., Рогаев К. С., Дьячковский А. С., Степанов Е. Ю. Экспериментально-теоретическое исследование горения зернового заряда в замкнутом объеме // Инженерно-физический ж., 2023. Т. 96. № 6. С. 1487–1493.
31. Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. Fundamentals of acoustics. — 4th ed. — John Wiley & Sons, 2000. 549 p.
32. 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.

Поступила в редакцию 25.12.2024

После доработки 14.01.2025

Принята к публикации 22.01.2025