

ОБЪЯСНЕНИЕ РОСТА СКОРОСТИ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВВЕРХ ПО ПОТОКУ В КАНАЛЕ С ПОГРАНИЧНЫМИ СЛОЯМИ*

В. А. Сабельников¹, В. В. Власенко², С. С. Молев³, А. И. Трошин⁴, С. Бахнэ⁵

Аннотация: При помощи численного моделирования исследована газодинамическая структура детонационной волны, распространяющейся против сверхзвукового потока в канале с пограничными слоями. Исследование основано на классических экспериментах J. C. Bellet и G. Deshayes (1970), которые показали, что при формировании структуры с отрывами пограничных слоев и детонационным диском Маха скорость детонационной волны по отношению к свежей горючей смеси существенно превосходит скорость одномерной (1D) детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ). Дан анализ газодинамической структуры детонационной волны, выявлен и объяснен механизм увеличения скорости детонации. Совместное воздействие зоны отрыва пограничного слоя и вторичной детонационной волны приводит к образованию газодинамического сопла Лавалья с запирающим потоком за детонационным диском Маха. Показано, что рассматриваемое течение можно отнести к классу двухслойных самоподдерживающихся детонаций. Рассмотрено влияние тепловых потоков, трехмерных (3D) эффектов и турбулентности на скорость волны.

Ключевые слова: детонация в канале; отрыв пограничного слоя; газодинамическое сопло Лавалья; запирающее

DOI: 10.30826/CE20130407

Литература

1. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. — М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. 268 с.
2. Fay J. A. Two-dimensional gaseous detonations: Velocity deficit // *Phys. Fluids*, 1959. Vol. 2. No. 3. P. 283–289.
3. Солоухин Р. И. Детонационные волны в газах // *Успехи физических наук*, 1963. Т. 80. № 8. С. 525–550.
4. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 168 с.
5. Gelfand B. E., Frolov S. M., Nettleton M. A. Gaseous detonations — a selective review // *Prog. Energ. Combust.*, 1991. Vol. 17. No. 4. P. 327–371.
6. Fickett W., Davis W. C. Detonation: Theory and experiment. — Courier Corp., 2000. 386 p.
7. MacKenna W. W. Interaction between detonation waves and flowfields // *AIAA J.*, 1967. Vol. 5. P. 868–873.
8. Curtis L. E., Hamilton L. A., Wright H. E., Elrod W. C. An investigation of shock initiated detonation waves in a flowing combustible mixture of hydrogen and oxygen // *Astronaut. Acta*, 1970. Vol. 15. No. 5–6. P. 453–463.
9. Васильев А. А., Звезинцев В. И., Наливайченко Д. Г. Детонационные волны в сверхзвуковом потоке реагирующей смеси // *Физика горения и взрыва*, 2006. Т. 42. № 5. С. 85–100.
10. Bellet J. C., Deshayes G. Structure and propagation of detonations in gaseous mixtures in supersonic flow // *Astronaut. Acta*, 1970. Vol. 15. P. 465–469.
11. Cai X., Liang J., Deiterding R., Mahmoudi Y., Sun M. Experimental and numerical investigations on propagating modes of detonations: Detonation wave/boundary layer interaction // *Combust. Flame*, 2018. Vol. 190. P. 201–215.

*Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (Договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.). Авторы благодарны Ф. А. Быковскому (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН), который указал на работы В. В. Митрофанова по двухслойным течениям, и С. М. Фролову (Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН), который обратил внимание на необходимость внешнего источника энергии для ускоренного движения детонации.

¹Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), sabelnikov@free.fr

²Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), vlasenko.vv@yandex.ru

³Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), molev@phystech.edu

⁴Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), ai-troshin@yandex.ru

⁵Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), serega733377@yandex.ru

12. *Menter F. R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // *Turbulence Heat Mass Transfer*, 2003. Vol. 4. P. 625–632.
13. *Jachimowski C. J.* Analytical study of the hydrogen–air reaction mechanism with application to scramjet combustion. — Hampton, VA, USA: NASA, Langley Research Center, 1988. NASA TP-2791. 16 p.
14. *Бабулин А. А., Босняков С. М., Власенко В. В., Енгулатова М. Ф., Матяш С. В., Михайлов С. В.* Опыт валидации и настройки моделей турбулентности применительно к задаче об отрыве пограничного слоя на клине конечной ширины // *Ж. вычисл. мат. мат. физ.*, 2016. Т. 56. № 6. С. 1034–1048.
15. *Bosnyakov S., Kursakov I., Lysenkov A., Matyash S., Mikhailov S., Vlasenko V., Quest J.* Computational tools for supporting the testing of civil aircraft configurations in wind tunnels // *Prog. Aerosp. Sci.*, 2008. Vol. 44. No. 2. P. 67–120.
16. *Власенко В. В., Михайлов С. В., Молев С. С., Трошин А. И., Ширяева А. А.* Программа для численного моделирования трехмерных течений с горением в каналах прямооточных воздушно-реактивных двигателей в рамках подходов URANS и DES с применением моделей взаимодействия турбулентности с горением, технологии дробного шага по времени и метода пристеночных функций (zFlare). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019610822 от 18.01.2019.
17. *Власенко В. В.* О различных способах определения теплового эффекта и полноты сгорания в потоке реагирующего газа // *Ученые записки ЦАГИ*, 2014. Т. XLV. № 1. С. 1–25.
18. *Higgins A.* Steady one-dimensional detonations // *Detonation dynamics* / Ed. F. Zhang. — Shock wave science and technology reference library book ser.— Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Vol. 6. P. 33–106.
19. *Зверев И. Н., Смирнов Н. Н.* Газодинамика горения. — Изд-во МГУ, 1987. 307 с.
20. *Митрофанов В. В.* О сверхскоростной детонации в рядах с продольными каналами // *Физика горения и взрыва*, 1975. Т. 11. № 1. С. 73–81.
21. *Щёлкин К. И.* Теория горения и детонации // *Механика в СССР за 50 лет* / Под ред. Л. И. Седова, Я. Б. Зельдовича, А. Ю. Ишлинского, М. А. Лаврентьева, Г. К. Михайлова, Н. И. Мухелишвили, Г. Г. Черного. — М.: Наука, 1970. Т. 2. С. 344–422.
22. *Сабельников В. А., Власенко В. В., Молев С. С.* Анализ взаимодействия движущейся детонации с турбулентными пограничными слоями в канале на основе численного моделирования // *Ученые записки ЦАГИ*, 2020. Т. LI. № 6. С. 14–27.
23. *Gritskevich M. S., Garbaruk A. V., Schütze J., Menter F. R.* Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model // *Flow Turbul. Combust.*, 2012. Vol. 88. No. 3. P. 431–449.

Поступила в редакцию 14.11.2020