

СТАЦИОНАРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ С ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ*

А. В. Троцюк

Институт гидродинамики Сибирского отделения Российской академии наук им. М. А. Лаврентьева

Аннотация: В процессе взаимодействия набегающего сверхзвукового потока с телом сжатия в потоке возникают ударные волны, детонационные волны (ДВ) или их комбинации. Основной задачей является выяснение условий стационарности возникающих ударно-детонационных конфигураций. В настоящей работе изложены основные результаты численного исследования двумерных сверхзвуковых течений с наклонными ДВ (НДВ), сформированные телами сжатия в виде: (а) плоского клина; (б) комбинации «клин – плоское тело»; (в) клин над твердой поверхностью; (г) в виде однозаходной спирали в промежутке между стенками двух коаксиальных цилиндров (двумерное приближение). Проведено численное исследование возможных режимов течения со стационарной НДВ в предложенных конфигурациях при варьировании геометрических размеров детонационной камеры (ДК) (прежде всего длины L), угла клина θ или спирали α , начальных параметров потока (M_0 , p_0 , T_0). Было выяснено, из каких основных структур состоит реагирующее течение внутри ДК рассматриваемых конфигураций, степень стационарности возникающего течения, механизм взаимодействия ударных и детонационных структур между собой и их изменения при вариации указанных выше параметров задачи. Для всех рассмотренных смесей и вариантов тела сжатия найден феномен двойного решения (бифуркации стационарного решения по начальным данным), т. е. после завершения переходного процесса финальная стационарная ударно-детонационная структура в сверхзвуковом потоке зависит от начального состояния течения в момент $t = 0$.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток; детонационная волна; детонационная кинетика; феномен двойного решения

DOI: 10.30826/CE25180406

EDN: ZZGIPX

Литература

1. Ждан С., Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Математическое моделирование вращающейся волны детонации в водородно-кислородной смеси // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43. № 4. С. 90–101. EDN: OEEVLP.
2. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2013. 422 с.
3. Frolov S. M., Zvegintsev V. I., Ivanov V. S., Aksenov V. S., Shamshin I. O., Vnuchkov D. A., Nalivaichenko D. G., Berlin A. A., Fomin V. M. 2017. Wind tunnel tests of a hydrogen-fueled detonation ramjet model at approach air stream Mach numbers from 4 to 8 // Int. J. Hydrogen Energ., 2017. Vol. 42. P. 25401–25413.
4. Frolov S. M., Zvegintsev V. I., Ivanov V. S., Aksenov V. S., Shamshin I. O., Vnuchkov D. A., Nalivaichenko D. G., Berlin A. A., Fomin V. M., Shiplyuk A. N., Yakovlev N. N. Hydrogen-fueled detonation ramjet model: Wind tunnel tests at approach air stream Mach number 5.7 and stagnation temperature 1500 K // Int. J. Hydrogen Energ., 2018. Vol. 43. P. 7515–7524.
5. Берлянд А. Т., Власенко В. В., Свищев С. В. Стационарные и нестационарные волновые структуры, возникающие при стабилизации детонации над поверхностью сжатия // Физика горения и взрыва, 2001. Т. 37. № 1. С. 94–111. EDN: ONVUQP.
6. Троцюк А. В. Численное моделирование структуры двумерной газовой детонации смеси H_2-O_2-Ar // Физика горения и взрыва, 1999. Т. 35. № 5. С. 93–103. EDN: YGBAHV.
7. Троцюк А. В., Фомин П. А. Моделирование ячеистой структуры детонационной волны в стехиометрической двухтопливной смеси синтез-газа с окислителем // Горение и взрыв, 2022. Т. 15. № 1. С. 47–56. doi: 10.30826/CE22150106.
8. Trotsyuk A. V., Kudryavtsev A. N., Ivanov M. S. Computational study of Mach reflection in chemically reacting steady flows. AIAA Paper No. 2004-0271, 3004. 11 p. doi: 10.2514/6.2004-271.
9. Trotsyuk A. V., Kudryavtsev A. N., Ivanov M. S. Numerical modeling of standing gas detonation waves. AIAA Paper No. 2006-3578, 2006. 14 p. doi: 10.2514/6.2006-3578.
10. Троцюк А. В., Кудрявцев А. Н., Иванов М. С. Численное исследование стационарных детонационных волн // Вычислительные технологии, 2006. Т. 11. Ч. 2. С. 37–44.
11. Trotsyuk A. V. Numerical study of detonation flows in a supersonic annular chamber // J. Phys. Conf. Ser., 2020. Vol. 1675. P. 012068. 6 p. doi: 10.1088/1742-6596/1675/1/012068.

Поступила в редакцию 06.03.2025

После доработки 13.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения Программы фундаментальных исследований РФ (проект 2.3.1.2.4. «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий» Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН). Вычисления проведены с использованием комплекса MVS-10Q в МСЦ НИЦ «Курчатовский институт», Москва. Статья основана на устном докладе, представленном на 14-м Международном коллоквиуме по импульсной и непрерывной детонации (ICPCD), прошедшем в Санкт-Петербурге (Россия) в период с 22 по 26 апреля 2024 г.