

ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ВОДОРОДА: ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА С ПОМОЩЬЮ МНОГОМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ*

В. С. Иванов¹, С. М. Фролов², А. Э. Зангиев³, В. И. Звегинцев⁴, И. О. Шамшин⁵

Аннотация: С помощью вычислительной технологии ФИЦ ХФ РАН проведены многовариантные трехмерные численные расчеты рабочего процесса в детонационном прямоточном воздушно-реактивном двигателе (ДПВРД), работающем на водороде, в условиях полета с числом Маха $M = 2,0$ на уровне моря. Доказана принципиальная возможность организации непрерывно-детонационного горения водорода в расширяющейся кольцевой камере сгорания (КС). Сформирован облик водородного ДПВРД для маршевой скорости полета $M = 2,0$ на уровне моря. Проведены трехмерные численные расчеты рабочего процесса в ДПВРД в условиях полета с числом Маха от 1,1 до 2,3. Показано, что расчетная эффективная тяга такого ДПВРД становится положительной при $M = 1,3$, т. е. число Маха подхвата для такого ДПВРД может быть очень низким: ниже $M = 2,0$, характерного для ПВРД на дефлаграционном горении. Разработан и изготовлен макет-демонстратор ДПВРД. Проведены его огневые испытания в импульсной аэродинамической трубе (АТ) при числе Маха $M = 2,0$ и 1,5. Важнейший результат испытаний при $M = 2,0$ — экспериментальное подтверждение возможности организации устойчивого непрерывно-детонационного горения водорода в ДПВРД разработанной конструкции. Важнейший результат испытаний при $M = 1,5$ — экспериментальное подтверждение возможности организации устойчивого непрерывно-детонационного горения водорода в ДПВРД разработанной конструкции при нерасчетной скорости полета. Тем самым экспериментально доказано, что число Маха подхвата для ДПВРД может принимать значение на уровне и меньше, чем $M = 1,5$, что соответствует расчету. Для обоих чисел Маха получены тягово-экономические характеристики ДПВРД.

Ключевые слова: детонационный прямоточный воздушно-реактивный двигатель; водород; трехмерные газодинамические расчеты; число Маха подхвата; аэродинамическая труба; огневые испытания

DOI: 10.30826/CE20130107

Литература

1. Ростопчин В. В. Микро-ТРД для беспилотных летательных аппаратов. — М.: ЦНИИ АРКС, 2004. 15 с.
2. Фролов С. М., Звегинцев В. И., Иванов В. С., Аксенов В. С., Шамшин И. О., Внучков Д. А., Наливайченко Д. Г., Берлин А. А., Фомин В. М. Непрерывно-детонационное горение водорода: результаты испытаний в аэродинамической трубе // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 3. С. 116–123. doi: 10.15372/FGV20180313.
3. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. № 17. С. 1455–1461.
4. Фролов С. М., Барыкин А. Е., Борисов А. А. Термодинамический цикл с детонационным сжиганием топлива // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 3. С. 17–25.
5. Дубровский А. В., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование характеристик прямоточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания в условиях сверхзвукового полета // Хим. физика, 2016. Т. 35. № 6. С. 49–63. doi: 10.7868/S0207401X16060042.
6. 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. Wind tunnel tests of a hydrogen-fueled detonation ramjet model at approach air stream Mach numbers from 4 to 8 // Int. J. Hydro-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-73-10196).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

⁴Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, zvegin@itam.nsc.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

- gen Energ., 2017. Vol. 42. P. 25401–25413. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.062.
7. 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: Wind tunnel tests at approach air stream Mach number and stagnation temperature 1500 K // Int. J. Hydrogen Energ., 2018. Vol. 43. P. 7515–7524. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.187.
 8. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Хим. физика, 2012. Т. 31. № 3. С. 32.
 9. Pope S. B. PDF methods for turbulent reactive flows // Prog. Energ. Combust., 1985. Vol. 11. P. 119–151. doi:10.1016/0360-1285(85)90002-4.
 10. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация топливовоздушных смесей // Физика горения и взрыва, 2006. Т. 42. № 4. С. 107–115.
 11. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Дубровский А. В., Иванов В. С., Шамшин И. О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 102.
 12. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. P. 1616. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.128.
 13. Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О., Аксёнов В. С. Испытания модели импульсно-детонационного прямооточного воздушно-реактивного двигателя в свободной воздушной струе с числом Маха до 0,85 // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 3. С. 43–52.
 14. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
 15. Иванов В. С., Сергеев С. С., Фролов С. М., Мионов Ю. М., Новиков А. Е., Шульц И. И. Измерение давления в непрерывно-детонационных камерах сгорания // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 1. doi: 10.30826/CE20130106. С. 55–65.

Поступила в редакцию 11.12.2019