

ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ВОДОРОДА: ДОВОДКА КОНСТРУКЦИИ И ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИ ЧИСЛАХ МАХА 1,5–2,5*

В. С. Иванов¹, С. М. Фролов², В. И. Звегинцев³, А. Э. Зангиев⁴, И. О. Шамшин⁵,
П. А. Гусев⁶

Аннотация: Выполнены расчетно-экспериментальные исследования по доводке конструкции макета-демонстратора (МД) детонационного прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ДПВРД), использующего водород в качестве горючего. Доводочные работы с применением вычислительной технологии ФИЦ ХФ РАН были направлены на повышение устойчивости воздухозаборного устройства (ВЗУ) при $M = 2,0$, снижение аэродинамического сопротивления и повышение тяговых характеристик МД ДПВРД. Изготовлен новый вариант МД и проведены его огневые испытания в импульсной аэродинамической трубе (АТ) при числах Маха набегающего воздушного потока $M = 1,5, 2,0$ и $2,5$. Важнейший результат огневых испытаний — значительное повышение тяговых характеристик нового варианта МД по сравнению со старым вариантом МД. Так, при $M = 1,5$ увеличение полной тяги и удельного импульса по топливу достигало 200 Н и 1100 с соответственно, а при $M = 2,0$ — 400 Н и 1300 с соответственно. Кроме того, при $M = 2,0$ значительно расширена область устойчивой работы камеры сгорания (КС) с непрерывно-детонационным горением водорода: от значения коэффициента избытка воздуха (КИВ) $\sim 1,6$ до $\sim 3,3$, причем при КИВ $= 3,1$ значение удельного импульса достигало ~ 4760 с. При $M = 2,5$ в ДПВРД данного типа впервые получен устойчивый непрерывно-детонационный рабочий процесс. Максимальные значения полной тяги и удельного импульса в испытаниях с $M = 2,5$ составили 1160 Н и 3780 с соответственно.

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

DOI: 10.30826/CE20130408

Литература

1. Иванов В. С., Фролов С. М., Зангиев А. Э., Звегинцев В. И., Шамшин И. О. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель с непрерывно-детонационным горением водорода: формирование облика с помощью многомерного численного моделирования и огневые испытания // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 1. С. 66–83. doi: 10.30826/CE20130107.
2. Ivanov V. S., Frolov S. M., Zangiev A. E., Zvegintsev V. I., Shamshin I. O. Hydrogen fueled detonation ramjet: Conceptual design and test fires at Mach 1.5 and 2.0 // Aerosp. Sci. Technol., 2021. Vol. 109. P. 106459. doi: 10.1016/j.ast.2020.106459.
3. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. № 17. С. 1453.
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

* Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме № 0082-2019-0006 (номер государственной регистрации АААА-А21-121011990037-8) и ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания по теме № 0580-2021-0005.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), ivanov.vls@gmail.com

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, zvegin@itam.nsc.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), igor.shamshin@mail.ru

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, gusevPA@yandex.ru

- 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. Hydrogen 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. 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.
 9. 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. 32–45.
 10. 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.
 11. 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. 1616–1623. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.128.
 12. Pope S. B. PDF methods for turbulent reactive flows // Prog. Energ. Combust., 1985. Vol. 11. P. 119–51. doi: 10.1016/0360-1285(85)90002-4.
 13. Frolov S. M., Ivanov V. S., Basara B., Suffa M. Numerical simulation of flame propagation and localized preflame autoignition in enclosures // J. Loss Prevent. Proc., 2013. Vol. 26. P. 302–309. doi: 10.1016/j.jlp.2011.09.007.
 14. Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О., Аксёнов В. С. Испытания модели импульсно-детонационного прямоточного воздушно-реактивного двигателя в свободной воздушной струе с числом Маха до 0,85 // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 3. С. 43–52.
 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. С. 55–65. doi: 10.30826/CE20130106.
 16. Ivanov V. S., Frolov S. M., Sergeev S. S., Mironov Yu. M., Novikov A. E., Schultz I. I. Pressure measurements in detonation engines // P. I. Mech. Eng. G — J. Aer., 2021. doi: 10.1177/0954410021993078.

Поступила в редакцию 14.11.2020