

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛИКА И ХАРАКТЕРИСТИК ПРЯМОТОЧНОЙ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ*

А. В. Дубровский¹, В. С. Иванов², А. Э. Зангиев³, С. М. Фролов⁴

Аннотация: С помощью многовариантных трехмерных численных расчетов доказана возможность организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в кольцевой камере сгорания прямооточной воздушно-реактивной силовой установки в условиях полета с числом Маха 5.0 на высоте 20 км при использовании водорода в качестве топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя. Предложены концептуальные схемы осесимметричной силовой установки со сверхзвуковым входным устройством, расширяющейся кольцевой камерой сгорания и выходным соплом с усеченно-коническим центральным телом. Расчеты внутреннего и внешнего течений с учетом конечной скорости турбулентно-молекулярного смешения компонентов горючего друг с другом и с продуктами их горения, а также конечной скорости химических превращений и вязкого взаимодействия течения с ограничивающими поверхностями показали, что в указанных условиях полета двигатель такой силовой установки может иметь следующие характеристики: тягу 16,7 кН, удельную тягу 0,75 кН·с/кг, удельный импульс 2660 с и удельный расход топлива $\sim 0,14$ кг/(Н·ч). При этом в камере сгорания может быть реализован рабочий процесс с одной или с двумя детонационными волнами, бегущими в кольцевом зазоре со средней скоростью 1400 м/с. Показано, что в камере сгорания существуют зоны дозвукового течения продуктов детонации, однако в ее выходном сечении течение везде сверхзвуковое.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по Государственному контракту № 14.609.21.0002 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0002) «Разработка технологий использования сжиженного природного газа (метан, пропан, бутан) в качестве топлива для ракетно-космической техники нового поколения и создание стендового демонстрационного образца ракетного двигателя» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; dubrovskii.alex@gmail.com

²Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; ivanov.vls@gmail.com

³Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; sydra777@gmail.com

⁴Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; smfrol@chph.ras.ru

Ключевые слова: прямоточный воздушно-реактивный двигатель; непрерывно-детонационная камера сгорания; водород; воздух; трехмерный расчет; тяга; удельный импульс

Литература

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1455–1461.
2. Heiser W. H., Pratt D. T. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines // J. Propul. Power, 2002. Vol. 18. No. 1. P. 68.
3. Фролов С. М., Барыкин А. Е., Борисов А. А. Термодинамический цикл с детонационным сжиганием топлива // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 3. С. 17–25.
4. Чванов В. К., Фролов С. М., Стернин Л. Е. Жидкостный детонационный ракетный двигатель // Труды НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко. — М.: НПО Энергомаш им. академика В. П. Глушко, 2012. № 29. С. 4–14.
5. Ждан С. А. Математическое моделирование непрерывной спиновой детонации в кольцевой камере сгорания при сверхзвуковой скорости потока // Физика горения и взрыва, 2008. Т. 44. № 6. С. 83–91.
6. Ждан С. А., Рыбников А. И. Непрерывная детонация в сверхзвуковом потоке водородо-кислородной смеси // Физика горения и взрыва, 2014. Т. 50. № 5. С. 63–74.
7. Фудживара Т., Хишида М., Киндрацки Ж., Волански П. Стабилизация детонации при любых входящих числах Маха // Физика горения и взрыва, 2009. Т. 45. № 5. С. 108–110.
8. Liu S., Liu W., Jiang L., Lin Z. Numerical investigation on the airbreathing continuous rotating detonation engine // 25th ICDERS Proceedings, 2015. Leeds, England. Paper #157.
9. Wang C., Liu W., Liu S., Jiang L., Lin Z. Propagation characteristics of continuous rotating detonation wave under different temperature air // 25th ICDERS Proceedings, 2015. Leeds, England. Paper #154.
10. Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания с отдельной подачей водорода и воздуха // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 2. С. 65–81.
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. 102–117.
12. 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.
13. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 4. С. 107–115.
14. 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.
15. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией при отдельной подаче горючего и окислителя // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 2. С. 56–65.

Поступила в редакцию 18.12.15