

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНДОВОГО ОБРАЗЦА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ СМЕСИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С КИСЛОРОДОМ*

С. Н. Медведев¹, В. С. Иванов², С. М. Фролов³

Аннотация: На примере результатов огневых испытаний стендового образца детонационного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), работающего на смеси природного газа (ПГ) с кислородом, определены прогностические возможности созданной в ИХФ РАН вычислительной технологии, предназначенной для полномасштабного моделирования рабочего процесса в непрерывно-детонационных камерах сгорания. При сравнении результатов расчетов с измерениями оказалось, что расчет точно прогнозирует количество детонационных волн, циркулирующих в тангенциальном направлении в кольцевой камере сгорания ЖРД заданной конструкции (четыре, три или одну волну), а также точно предсказывает околопредельный режим с детонацией, пульсирующей в продольном направлении, в ЖРД с внешним соплом. Расчет с приемлемой точностью предсказывает и рабочую частоту процесса, т. е. дает значения скорости детонации, близкие к измеренным. Кроме того, расчет правильно предсказывает тенденции изменения параметров рабочего процесса при понижении расхода топливной смеси в ЖРД заданной конструкции: как и в эксперименте, количество детонационных волн, частота вращения детонации и тяга при этом уменьшаются. Как и в эксперименте, установка внешнего сопла приводит к увеличению тяги. Что касается самих значений тяги, то расчет их систематически завышает по сравнению с измерениями, как минимум, на 27%, причем такое завышенное значение тяги получается даже при холодной продувке ЖРД.

* 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» и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-00782).

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения, medvedevs@chph.ras.ru

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; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

Ключевые слова: непрерывно-детонационная камера сгорания; жидкостный ракетный двигатель; природный газ; кислород; трехмерный расчет; тяга

Литература

1. 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.
2. Фролов С. М., Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Экспериментальное доказательство энергоэффективности термодинамического цикла Зельдовича // Докл. РАН, 2014. Т. 459. № 6. С. 711–716.
3. Frolov S. M., Aksekov V. S., Ivanov V. S. Experimental proof of Zel'dovich cycle efficiency gain over cycle with constant pressure combustion for hydrogen–oxygen fuel mixture // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. No. 21. P. 6970–6975.
4. 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.
5. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
6. Kindracki J., Wolanski P., Gut Z. Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels – oxygen mixtures // Shock Waves, 2011. Vol. 21. P. 75–84.
7. Фролов С. М., Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Экспериментальные исследования стендовых образцов малоразмерных ракетных двигателей с непрерывно-детонационными камерами сгорания // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 1. С. 151–163.
8. Иванов В. С., Аксенов В. С., Фролов С. М., Шамшин И. О. Экспериментальные исследования стендового образца ракетного двигателя с непрерывно-детонационным горением смеси природного газа с кислородом // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 2. С. 51–64.
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. Левин В., Коробейников В. Сильный взрыв в горючей смеси газов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 1969. № 6. С. 48–48.
11. Басевич В. Я., Фролов С. М. Глобальные кинетические механизмы для моделирования многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // Хим. физика, 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.
12. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C_1 – C_{10} к C_{11} – C_{16} // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 4. С. 1–10.
13. Pope S. B. CEQ: A Fortran library to compute equilibrium compositions using Gibbs function continuation. 2003. <http://eccentric.mae.cornell.edu/~pope/CEQ>.

Поступила в редакцию 18.12.15