

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕНДОВОГО ОБРАЗЦА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ СМЕСИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С КИСЛОРОДОМ\*

В. С. Иванов<sup>1</sup>, В. С. Аксёнов<sup>2</sup>, С. М. Фролов<sup>3</sup>, И. О. Шамшин<sup>4</sup>

**Аннотация:** Экспериментально изучается влияние конструктивных элементов стендового образца жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с непрерывно-детонационной камерой сгорания и параметров подачи топливных компонентов (природного газа (ПГ) и кислорода) на характеристики рабочего процесса и на тяговые характеристики. В испытаниях изменяли абсолютные давления подачи ПГ (до 30 атм) и кислорода (до 15 атм); расход топливной смеси от 0,05 до 0,7 кг/с; состав смеси: от обедненного горючим с коэффициентом избытка горючего  $\Phi = 0,5$  до обогащенного с  $\Phi = 2,0$ . Максимальная тяга и максимальный удельный импульс, полученные в испытаниях, составили 75 кГ и 160 с соответственно при среднем давлении в камере сгорания около 10 атм. Показано, что с повышением давления в камере сгорания и тяга, и удельный импульс монотонно повышаются. С ростом удельного расхода топливной смеси рабочий процесс в камере сгорания, с одной стороны, становится более устойчивым, а с другой — количество детонационных волн, одновременно вращающихся в камере сгорания в одном направлении, увеличивается. Замена расходной шайбы на профилированное сопло в выходном сечении камеры сгорания при прочих близких условиях приводит к повышению тяговых характеристик, однако скорость детонации при этом существенно снижается (до 1500 м/с по сравнению с 2200 м/с), приближаясь к предельным значениям.

---

\* 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).

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения, ivanov.vls@gmail.com

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

<sup>3</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

<sup>4</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», shamshin@idgcenter.ru

**Ключевые слова:** непрерывно-детонационная камера сгорания; жидкостный ракетный двигатель; природный газ; кислород; эксперимент; тяга; удельный импульс

## Литература

1. Белов Е. А., Богущев В. Ю., Клепиков И. А., Смирнов А. М. Результаты экспериментальных работ в НПО Энергомаш по освоению метана как компонента топлива для ЖРД // Труды НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко. — М.: НПО Энергомаш им. академика В. П. Глушко, 2000. № 18. С. 86–89.
2. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1455–1461.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
8. 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.
9. 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.

Поступила в редакцию 18.12.15