

ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ТОПЛИВНОЙ ПАРЕ «МЕТАН–КИСЛОРОД»

С. М. Фролов¹, В. С. Иванов², И. О. Шамшин³, Ю. В. Козаренко⁴

Аннотация: Проведены огневые испытания модифицированной кольцевой камеры сгорания (КС) непрерывно-детонационного двигателя (НДД), работающего на метане и кислороде. Конструкция исходной КС НДД, испытанной в 2018 г., модифицирована в части изменения схемы водяного охлаждения, размещения датчиков и формы сверхзвукового сопла. Получен устойчивый рабочий процесс с одной детонационной волной (ДВ), непрерывно вращающейся в кольцевом зазоре со скоростью ~ 1900 м/с (частота вращения ~ 6 кГц) в широком диапазоне расходов топливных компонентов. Это важная отличительная особенность данной КС по сравнению с известными литературными аналогами, в которых увеличение расхода топливных компонентов приводит к увеличению количества ДВ, одновременно вращающихся в кольцевом зазоре. По сравнению с исходной КС максимальная продолжительность работы и удельный импульс модифицированной КС увеличены с 1 до 30 с и с 250 до 277 с соответственно. Определены тепловые состояния всех теплонапряженных элементов конструкции КС НДД: максимальные тепловые потоки зарегистрированы в рубашках охлаждения центрального тела и в наружной стенке КС. Показано, что тепловые потери в системе охлаждения возрастают с ростом среднего давления в КС. Максимальное значение среднего теплового потока (выше 20 МВт/м²) зарегистрировано на наружной стенке КС. Средний тепловой поток в наружную стенку КС примерно на 20% выше, чем в центральное тело, и в несколько раз выше, чем в стенки сопла. Суммарные тепловые потери в водоохлаждаемые стенки КС составили около 10% от общей тепловой мощности КС.

Ключевые слова: непрерывно-детонационный двигатель; метан; кислород; огневые испытания; удельный импульс; тепловое состояние

DOI: 10.30826/CE25180205

EDN: LTOMOV

Литература

1. Белов Е. А., Богушев 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, 2000. № 8. С. 86–89.
2. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. № 17. С. 1453–1458.
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. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О., Яковлев Н. Н., Костенко И. И. Ракетный двигатель с непрерывно-детонационным горением топливной пары «природный газ – кислород» // Докл. Акад. наук, 2018. Т. 478. № 4. С. 429–433.
5. Чванов В. К., Фролов С. М., Стернин Л. Е. Жидкостный детонационный ракетный двигатель // Труды НПО Энергомаш, 2012. № 29. С. 4–14.
6. 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. Акад. наук, 2014. Т. 459. № 6. С. 711–716.
7. Frolov S. M., Aksenov 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.
8. 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.
9. Kindracki J., Wolanski P., Gut Z. Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels – oxygen mix-

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; smfrol@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; ivanov.vls@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; igor_shamshin@mail.ru

⁴ООО «Транспорт будущего», п. Белая Вежа Белгородской обл., info@tb-drone.ru

- tures // Shock Waves, 2011. Vol. 21. P. 75–84.
10. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
 11. 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.
 12. Иванов В. С., Аксёнов 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.
 13. Goto K., Yokoo R., Kim J., Kawasaki A., Matsuoka K., Kasahara J., Matsuo A., Funaki I., Nakata D., Uchiu-mi M., Higashino K. Experimental performance validation of a rotating detonation engine toward a flight demonstration // AIAA Scitech 2019 Forum. — San Diego, CA, USA, 2019. doi: 10.2514/6.2019-1501.
 14. Двигатель РД-107А. <https://www.uecrus.com/products-and-services/products/raketnye-dvigateli/dvigatel-rd-107a/>.
 15. 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. Vol. 235. No. 14. P. 2113–2134. doi: 10.1177/0954410021993078.

Поступила в редакцию 26.12.2024

После доработки 24.01.2025

Принята к публикации 04.02.2025