

РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С НЕПРЕРЫВНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО*

С. М. Фролов¹, И. О. Шамшин², В. С. Аксёнов³, И. А. Садыков⁴, П. А. Гусев⁵,
В. А. Зеленский⁶, Е. В. Евстратов⁷, М. И. Алымов⁸

Аннотация: Впервые экспериментально доказана возможность организации непрерывно-детонационного горения пленки жидкого горючего в кольцевой камере сгорания (КС) демонстрационного образца жидкостного детонационного ракетного двигателя (ДРД). В огневых испытаниях зарегистрированы около-предельный режим продольно-пульсирующей «пленочной» детонации (ППД) и режимы непрерывной спиновой «пленочной» детонации (НСД) с одной и двумя детонационными волнами (ДВ), циркулирующими в кольцевом зазоре КС.

Ключевые слова: жидкостный детонационный ракетный двигатель; пленочная детонация; непрерывная спиновая детонация; продольно-пульсирующая детонация; эксперимент

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Шамшин И. О. Переход горения в детонацию в системе газ–пленка жидкого горючего // Докл. РАН, 2017. Т. 474. № 4. С. 448–453. doi: 10.1134/S0012501617060021.
2. Комов В. Ф. Трошин Я. К. О свойствах детонации в некоторых гетерогенных системах // Докл. РАН, 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
3. Ragland K. W., Nicholls J. A. Two-phase detonation of a liquid layer // AIAA J., 1969. Vol. 7. No. 5. P. 859–863.
4. Фролов С. М., Аксенов В. С., Шамшин И. О. Переход горения в детонацию в стратифицированной системе кислород–пленка жидкого топлива // Хим. физика, 2017. Т. 36. № 6. С. 34–44. doi: 10.7868/S0207401X17060073.
5. Шамшин И. О., Аксенов В. С., Фролов С. М. Переход горения в детонацию в гетерогенной системе «кислород–пленка жидкого n-декана» // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 4. С. 37–45.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
7. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. Continuous detonation combustion of ternary “hydrogen – liquid propane – air” mixture in annular combustor // Int. J. Hydrogen Energ., 2017. Vol. 42. No. 26. P. 16808–16820. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.138.
8. 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. РАН, 2018. Т. 478. № 4. С. 429–433.
9. 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.2014.11.112.
10. Anand V., St. George A., Driscoll R., Gutmark E. Investigation of rotating detonation combustor operation with H₂–air mixtures // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 41. No. 2. P. 1281–1292.
11. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангилев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемиионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-00782) и за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 44.8 «Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами» (Номер госрегистрации 0082-2016-0011).

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; Институт системных исследований Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

²Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», igor_shamshin@mail.ru

³Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

⁴Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», churus1314@rambler.ru

⁵Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, gusevra@yandex.ru

⁶Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, zelenky55@bk.ru

⁷Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, even@ultra.imet.ac.ru

⁸Институт структурной макрокинетики им. Г. А. Мержанова Российской академии наук, alymov@ism.ac.ru

- РАН, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67. doi: 10.7868/S0869565215310138.
12. *Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С.* Трёхмерное 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. doi: 10.7868/S0207401X13020064.
13. *Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М.* Трёхмерное численное моделирование рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания с отдельной подачей водорода и воздуха // *Хим. физика*, 2015. Т. 34. № 2. С. 65–81. doi: 10.7868/S0207401X1502003X.

Поступила в редакцию 01.02.18

CONTINUOUS FILM DETONATION OF LIQUID FUEL

S. M. Frolov^{1,2,3}, I. O. Shamshin^{1,2}, V. S. Aksenov^{1,2}, I. A. Sadykov^{1,2}, P. A. Gusev^{1,4},
V. A. Zelenskii⁵, E. V. Evstratov⁵, and M. I. Alymov⁶

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

³Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

⁴Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 13-2 Izhorskaya Str., Moscow 125412, Russian Federation

⁵A. A. Baikov Institute of Metallurgy, Russian Academy of Sciences, 49 Leninskiy Prosp., Moscow 119334, Russian Federation

⁶A. G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russian Federation

Abstract: The possibility of organizing a continuous-detonation combustion of a liquid fuel film in an annular combustor (AC) of a demonstration sample of a liquid propellant detonation rocket engine has been proved experimentally for the first time. The near-limit mode of the longitudinally pulsating “film” detonation and the continuous spinning “film” detonation modes with one and two detonation waves circulating in the annular gap of the AC are recorded in the fire tests.

Keywords: liquid propellant detonation rocket engine; film detonation; continuous spin detonation; longitudinally pulsating detonation; experiment

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-08-00782) and by the subsidy given to N. N. Semenov Institute of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the state assignment on the topic “Fundamental studies of conversion processes of energetic materials and development of scientific grounds of controlling these processes” (Registration No. 0082-2016-0011).

References

1. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. 2017. Deflagration-to-detonation transition in the gas–liquid-fuel film system. *Dokl. Phys. Chem.* 474(2):93–98. doi: 10.1134/S0012501617060021.
2. Komov, V. F., and Ya. K. Troshin. 1967. O svoystvakh detonatsii v nekotorykh geterogennykh sistemakh [On the properties of detonation in some heterogeneous systems]. *Dokl. Akad. Nauk* 175(1):109–112.
3. Ragland, K. W., and J. A. Nicholls. 1969. Two-phase detonation of a liquid layer. *AIAA J.* 7(5):859–863.
4. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. 2017. Perekhod goreniya v detonatsiyu v stratifitsirovannoy sisteme kislorod – plenka zhidkogo topliva [Deflagration-to-detonation transition in the stratified system “oxygen – liquid fuel film”]. *Russ. J. Phys. Chem. B* 36(6):34–44. doi: 10.7868/S0207401X17060073.
5. Shamshin, I. O., V. S. Aksenov, and S. M. Frolov. 2017. Perekhod goreniya v detonatsiyu v geterogennoy sisteme “kislorod – plenka zhidkogo *n*-dekana” [Deflagration-to-detonation transition in the heterogeneous system “oxygen – liquid *n*-decane film”]. *Goren. Vzryv (Mosk.) – Combustion and Explosion* 10(4):37–45.
6. Bykovskii, F. A., and S. A. Zhdan. 2013. *Nepreryvnaya spinovaya detonatsiya* [Continuous spinning detonation]. Novosibirsk: SB RAS Pubs. 423 p.
7. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2017. Continuous detonation combustion of ternary “hydrogen – liquid propane – air” mixture in annular combustor. *Int. J. Hydrogen Energ.* 42(26):16808–16820. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.138.
8. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, I. O. Shamshin, N. N. Yakovlev, and I. I. Kostenko. 2018. Rocket engine with continuous detonation combustion of the natural gas–oxygen propellant system. *Dokl. Phys. Chem.* 478(2):31–34.
9. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2015. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor. *Int. J. Hydrogen Energ.* 40:1616–1623. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.112.
10. Anand, V., A. St. George, R. Driscoll, and E. Gutmark. 2016. Investigation of rotating detonation combustor op-

- eration with H₂–air mixtures. *Int. J. Hydrogen Energ.* 41(2):1281–1292.
11. Frolov, S. M., V. S., Aksenov, A. V. Dubrovskii, A. E. Zangiev, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, and I. O. Shamshin. 2015. Chemiionization and acoustic diagnostics of the process in continuous- and pulse-detonation combustors. *Dokl. Phys. Chem.* 465(1):273–278. doi: 10.1134/S0012501615110019.
12. Frolov, S. M., A. V. Dubrovskii, and V. S. Ivanov. 2013. Three-dimensional numerical simulation of the operation of a rotating-detonation chamber with separate supply of fuel and oxidizer. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7(1):35–43. doi: 10.1134/S1990793113010119.
13. Dubrovskii, A. V., V. S. Ivanov, and S. M. Frolov. 2015. Three-dimensional numerical simulation of the operation process in a continuous detonation combustor with separate feeding of hydrogen and air. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(1):104–119. doi: 10.1134/S1990793115010157.

Received February 1, 2018

Contributors

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; igor_shamshin@mail.ru

Aksenov Victor S. (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

Sadykov Ilyas A. (b. 1993) — student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; churus1314@rambler.ru

Gusev Pavel A. (b. 1942) — Candidate of Science in physics and mathematics, research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; gusevpa@yandex.ru

Zelenskii Viktor A. (b. 1955) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading scientist, A. A. Baikov Institute of Metallurgy, Russian Academy of Sciences, 49 Leninskiy Prosp., Moscow 119334, Russian Federation; zelensky55@bk.ru

Evstratov Evgenii V. (b. 1979) — Candidate of science in technology, senior research scientist, A. A. Baikov Institute of Metallurgy, Russian Academy of Sciences, 49 Leninskiy Prosp., Moscow 119334, Russian Federation; even@ultra.imet.ac.ru

Alymov Mikhail I. (b. 1957) — Doctor of Science in technology, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, director, A. G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russian Federation; alymov@ism.ac.ru