

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАВЛЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦА ПАРАФИНА В ПОТОКЕ ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА\*

С. А. Рашковский<sup>1</sup>, В. А. Усанов<sup>2</sup>, Г. В. Гембаржевский<sup>3</sup>, С. Е. Якуш<sup>4</sup>

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментов по обдуву образцов парафина горячим воздухом, приводящему к плавлению материала, формированию тонкого слоя расплава, его диспергированию и самовоспламенению. Рассмотрены вопросы измерения продольных сил, возникающих при истечении продуктов горения из рабочей камеры. Приведены результаты серии экспериментов в широком диапазоне расходов воздуха, температур на входе в рабочую камеру и давлений, включая время задержки зажигания, максимальное давление в камере и развиваемую силу тяги. Представлены оценки удельного импульса, свидетельствующие, на примере парафина, о перспективности использования легкоплавких топлив в гибридных ракетных двигателях (ГРД).

**Ключевые слова:** плавление; самовоспламенение; парафин; гибридный ракетный двигатель; эксперименты

**DOI:** 10.30826/CE25190108

**EDN:** NPXQUE

### Литература

1. *Mazzetti A., Merotto L., Pinarello G.* Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective // *Acta Astronaut.*, 2016. Vol. 126. P. 286–297. doi: 10.1016/j.actaastro.2016.04.036.
2. *Okninski A.* On use of hybrid rocket propulsion for suborbital vehicles // *Acta Astronaut.*, 2018. Vol. 145. P. 1–10. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.027.
3. *Okninski A., Kopcak W., Kaniewski D., Sobczak K.* Hybrid rocket propulsion technology for space transportation revisited — propellant solutions and challenges // *FirePhysChem*, 2021. Vol. 1. No. 4. P. 260–271. doi: 10.1016/j.fpc.2021.11.015.
4. *Calabro M.* Overview on hybrid propulsion // *Progress in propulsion physics* / Eds. L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, S. Frolov. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — EDP Sciences — TORUS PRESS, 2011. Vol. 2. P. 353–374. doi: 10.1051/eucass/201102353.
5. *Ozhan C., Coverstone V.* Utilization of additive manufacturing in hybrid rocket technology: A review // *Acta Astronaut.*, 2021. Vol. 180. P. 130–140. doi: 10.1016/j.actaastro.2020.11.024.
6. *Petrarolo A., Kobald M., Schlechtriem S.* Understanding Kelvin–Helmholtz instability in paraffin-based hybrid rocket fuels // *Exp. Fluids*, 2018. Vol. 59. No. 4. Paper 62. doi: 10.1007/s00348-018-2516-1.
7. *Liu X., Hu S., Wang Y., Zhang W., Liu L.* Droplet entrainment characteristics of HTPB/paraffin blended fuels for hybrid rocket motors // *Acta Astronaut.*, 2024. Vol. 214. P. 293–302. doi: 10.1016/j.actaastro.2023.10.043.
8. *Karabeyoglu M. A., Altman D., Cantwell B. J.* Combustion of liquefying hybrid propellants: Part 1, general theory // *J. Propul. Power*, 2002. Vol. 18. No. 3. P. 610–620. doi: 10.2514/2.5975.
9. *Karabeyoglu M. A., Cantwell B. J.* Combustion of liquefying hybrid propellants: Part 2, stability of liquid films // *J. Propul. Power*, 2002. Vol. 18. No. 3. P. 621–630. doi: 10.2514/2.5976.
10. *Weinstein A., Gany A.* Testing and modeling liquefying fuel combustion in hybrid propulsion // *Progress in propulsion physics* / Eds. L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, S. Frolov. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — 2013. EDP Sciences — TORUS PRESS, P. 99–112. doi: 10.1051/eucass/201304099.
11. *Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A.* Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: A review // *Prog. Energ. Combust.*, 2022. Vol. 91. P. 100980. doi: 10.1016/j.pecc.2021.100980.
12. *Kiskin A. B., Zarko V. E., Eremin I. V.* Studying the paraffin based mixtures regression under high speed hot air blowing // *Acta Astronaut.*, 2024. Vol. 216. P. 330–335. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.01.005.
13. *Рашковский С. А., Якуш С. Е., Баранов А. А.* Моделирование твердотопливного прямогоочного воздушно-реактивного двигателя со стабилизатором горения // *Горение и взрыв*, 2017. Т. 10. № 2. С. 79–84.
14. *Betelin V. B., Kushnirenko A. G., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Tyurenkova V. V., Stamov L. I.* Numerical investigations of hybrid rocket engines // *Acta Astronaut.*, 2018. Vol. 144. P. 363–370. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.009.

\*Исследования проведены в рамках проекта РНФ № 24-19-00703 «Многофазные явления при воздействии горячих газов на легкоплавкие горючие материалы: эксперименты и вычислительные модели».

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, rash@ipmnet.ru

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, usanov@ipmnet.ru

<sup>3</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, gvgemb@ipmnet.ru

<sup>4</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, yakush@ipmnet.ru

15. *Rashkovskiy S. A., Yakush S. E.* Numerical simulation of low-melting temperature solid fuel regression in hybrid rocket engines // *Acta Astronaut.*, 2020. Vol. 176. P. 710–716. doi: 10.1016/j.actaastro.2020.05.002.
16. *Kushnirenko A. G., Stamov L. I., Tyurenkova V. V., Smirnova M. N., Mikhhalchenko E. V.* Three-dimensional numerical modeling of a rocket engine with solid fuel // *Acta Astronaut.*, 2021. Vol. 181. P. 544–551. doi: 10.1016/j.actaastro.2021.01.028.
17. *Yakush S. E., Rashkovskiy S. A.* Modeling of liquefying material interaction with hot gas flow in application to hybrid rocket engines // *AIP Conf. Proc.*, 2021. Vol. 2351. No. 1. P. 030069. doi: 10.1063/5.0052253.
18. *Migliorino M. T., Fabiani M., Paravan C., Bianchi D., Nasuti F., Galfetti L., Pellegrini R. C., Cavallini E.* Numerical and experimental analysis of fuel regression rate in a lab-scale hybrid rocket engine with swirl injection // *Aerosp. Sci. Technol.*, 2023. Vol. 140. P. 108467. doi: 10.1016/j.ast.2023.108467.
19. *Usanov V. A., Gembarzhevskii G. V., Rashkovskiy S. A., Yakush S. E.* Melting and regression of paraffin samples in hot air flow // *Heat Transf. Res.*, 2025. Vol. 56. No. 8. P. 27–44. doi: 10.1615/HeatTransRes.2024056249.
20. *Usanov V. A., Gembarzhevskii G. V., Rashkovskiy S. A., Yakush S. E.* Critical conditions for self-ignition of a paraffin slab in high-temperature air flow // *Acta Astronaut.*, 2025 (in press). doi: 10.1016/j.actaastro.2025.10.059.
21. *Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М.* Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980, 478 с.
22. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. — 5-е изд. — М.: Наука, 1991. Ч. 1. 600 с.

Поступила в редакцию 11.11.2025

После доработки 14.01.2026

Принята к публикации 19.01.2026