

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

С. Г. Ребров¹, В. А. Голубев², А. Н. Голиков³, И. А. Ганин⁴, В. В. Кошлаков⁵,
А. В. Блошенко⁶

Аннотация: Рассматриваются результаты исследования по определению оптимальных зон для обеспечения лазерного зажигания кислородно-водородной топливной смеси в модельной камере сгорания (КС) при фокусировке излучения с инициированием искры оптического пробоя в выбранной области. Приводятся результаты численного моделирования нестационарного процесса смешения газообразных компонентов — кислорода и водорода — с определением параметров получаемой смеси в объеме модельной КС, проведенного в программном комплексе ЛОГОС-Препост. Из рассматриваемых зон, в которых возможна фокусировка излучения при реализации лазерного зажигания, предпочтительными для воспламенения выбраны области обратных токов с более близкими к стехиометрическому составам топливной смеси и низкими скоростями потока компонентов. Преимущественное использование выбранных по результатам численного моделирования зон для лазерного зажигания подтверждено огневыми испытаниями.

Ключевые слова: численное моделирование; камера сгорания; кислород; водород; лазерное зажигание; оптический пробой

DOI: 10.30826/CE24170401

EDN: MOGQUJ

Литература

1. Choudhary G., Hansen H. Human health perspective on environmental exposure to hydrazines: A review // *Chemosphere*, 1998. Vol. 37. No. 5. P. 801–843. doi: 10.1016/s0045-6535(98)00088-5.
2. Епифанов И. К., Кондратьев А. Д., Дорошина С. В. Экологический ущерб при аварии ракет-носителей на активном участке полета // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*, 2009. Т. 5. № 24. С. 53–57.
3. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
4. Ross M., Mills M., Toohey D. Potential climate impact of black carbon emitted by rockets // *Geophys. Res. Lett.*, 2010. Vol. 37. No. 24. Art. L24810. 6 p. doi: 10.1029/2010GL044548.
5. Ross M., Vedda J. A. The policy and science of rocket emissions. — Arlington, VA, USA: Aerospace Corp., Center for Space Policy and Strategy, 2018. 12 p.
6. Wintner E. Laser ignition of engines: Technology, benefits and challenges // *Latin America Optics and Photonics Conference*, 2014. Paper LFP.1. doi: 10.1364/LAOP.2014.LFP.1.
7. Wintner E., Kofler H., Agarwal A. K., Deneva M. A., Nenchev M. N. Laser ignition of engines — a contribution to environmental protection and a challenge to laser technology // *Annual J. Electronics*, 2014. Vol. 8. P. 1–4.
8. Hasegawa K., Kusaka K., Kumakawa A., Sato M., Tadano M. Laser ignition characteristics of GOx/GH₂ and GOx/GCH₄ propellants. AIAA Paper No.2003-4906, 2003. doi: 10.2514/6.2003-4906.
9. Ребров С. Г., Голиков А. Н., Голубев В. А. Лазерное воспламенение ракетных топлив в модельной камере сгорания // *Труды МАИ*, 2012. № 53. Ст. 10. <http://trudymai.ru/published.php?ID=29491>.
10. Белов Е. А., Голиков А. Н., Голубев В. А., Дубовик Д. И., Иванов Н. Г., Ключева О. Г., Лёвочкин П. С., Ребров С. Г., Ромасенко Е. Н. Экспериментальное исследование влияния расположения зоны фокусировки лазера на воспламенение топлива кислород–керосин // *Труды НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко*, 2013. № 30. С. 120–134.

¹Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»), rebrov-sergey@mail.ru

²Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»), golubev.va@mail.ru

³Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»), andgolikov@mail.ru

⁴Приволжский филиал акционерного общества «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко», pfenergo@samtel.ru

⁵Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»), kerc@elnet.msk.ru

⁶Госкорпорация «Роскосмос», info@roscosmos.ru

11. Чванов В. К., Ганин И. А., Иванов Н. Г., Лёвочкин П. С., Ромасенко Е. Н., Сурков Б. А. Экспериментальное исследование лазерного воспламенения топлива кислород–керосин в камерах ЖРД // Труды НПО Энергомаш, 2015. № 32. С. 113–133.
12. Ребров С. Г., Голубев В. А., Голиков А. Н. Лазерное зажигание топлива кислород–керосин в ракетной технике: от запальных устройств к маршевым ракетным двигателям // Труды МАИ, 2017. № 95. Ст. 12. https://trudymai.ru/upload/iblock/030/Rebrov_Golubev_Golikov_rus.pdf?lang=ru&issue=95.
13. Börner M., Manfretti C., Hardi J., et al. Laser ignition of a multi-injector LOx/methane combustor // CEAS Space J., 2018. Vol. 10. No. 2. P. 273–286. doi: 10.1007/s12567-018-0196-6.
14. Ребров С. Г., Голубев В. А., Голиков А. Н. Лазерное зажигание кислородно–углеводородных топлив в ракетных двигателях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2018. № 7. С. 77–91. doi: 10.18698/0536-1044-2018-7-77-91.
15. Ребров С. Г., Голубев В. А., Космачев Ю. П., Космачева В. П. Лазерное зажигание топлива жидкий кислород–газообразный водород в крупноразмерной камере сгорания // Известия высших учебных заведений, 2019. № 12. С. 104–114. doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-104-114.
16. Shynkarenko O., Simone D. Oxygen–methane torch ignition system for aerospace applications // Aerospace, 2020. Vol. 7. No. 114. P. 1–10. doi: 10.3390/aerospace7080114.
17. Андронов А. А., Гурин В. А., Маругин А. В. и др. Лазерное зажигание в двигателях внутреннего сгорания: безыскровый поджиг // Письма в ЖТФ, 2014. Т. 40. Вып. 15. С. 66–70.
18. Richardson S., McMillian M., Woodruff S., McIntyre D. Misfire, knock and NOx mapping of a laser spark ignited single cylinder lean burn natural gas engine. SAE Technical Paper 2004-01-1853, 2004. doi: 10.4271/2004-01-1853.
19. Maillard M., Hudebine G. A., Orain M., et al. Ignition of a Safran's helicopter engine with a compact nanosecond laser system // Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2023. Paper GT2023-103897. 8 p. doi: 10.1115/GT2023-103897.
20. Patil S. S., Patane P. M., Nandgaonkar M. R. Laser ignition and flame propagation of methanol–air mixture in a constant volume combustion chamber // Energ. Source. Part A, 2023. Vol. 45(4). P. 11142–11154. doi: 10.1080/15567036.2023.2255156.
21. Zhang Wei, Zang Hongwei, Wang Shuo, Chen Junyan. Non-resonant photochemical ignition of lean methane/air mixtures by femtosecond laser filamentation // Combust. Flame, 2024. Vol. 266. Article No. 113542. doi: 10.1016/j.combustflame.2024.113542.
22. Островская Г. В., Зайдель А. Н. Лазерная искра в газах // Успехи физических наук, 1973. Т. 111. № 4. С. 579–615.
23. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957. 453 с.
24. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1968. 592 с. (Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. — New York, London: Academic Press Inc., 1961. 739 p.)
25. Раушенбах Б. В., Белый А. А., Беспалов И. В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно–реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964. 526 с.
26. Lim E. H., McIlroy A., Ronney P. D., Syage J. A. Detailed characterization of minimum ignition energies of combustible gases using laser ignition sources // 8th Symposium (International) on Transport Phenomena in Combustion Proceedings. — San Francisco, CA, USA, 1995. P. 176–184.
27. Ребров С. Г., Голубев В. А., Голиков А. Н., Моргунов А. Е. Исследование влияния параметров топливных смесей кислород–водород и кислород–метан на возможность лазерного зажигания // Горение и взрыв, 2022. Т. 15. № 4. С. 10–18. doi: 10.30826/CE22150402.

Поступила в редакцию 26.06.2024