

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ ПЛОСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭТИЛЕНА И КИСЛОРОДА*

И. О. Шамшин¹, В. С. Иванов², В. С. Аксёнов³, П. А. Гусев⁴, К. А. Авдеев⁵, С. М. Фролов⁶

Аннотация: Непрерывно-детонационные двигатели (НДД) считаются перспективными двигателями для аэрокосмических приложений. Инициирование детонации в НДД может сопровождаться разрушительным взрывом избыточного объема топливной смеси в камере сгорания. Для исключения этого явления требуется «мягкое», а не «сильное» инициирование детонации. Для мягкого инициирования детонации в НДД необходимо воспламенить смесь определенного минимального объема, достаточного для перехода горения в детонацию (ПГД). В данной работе экспериментально получены критические условия инициирования детонации через ПГД в полуограниченной щелевой камере сгорания, моделирующей камеру сгорания НДД с раздельной подачей этилена и кислорода, разбавленных азотом (от 0 до 40 % (об.)) при коэффициенте избытка горючего в образующейся смеси от 0,3 до 2,3. Оказалось, что для мягкого инициирования детонации необходимо воспламенить смесь по достижении критической (минимальной) высоты слоя горючей смеси. Так, для мягкого инициирования детонации в неразбавленной смеси $C_2H_4 + 3O_2$, заполняющей такую щелевую камеру сгорания, высота слоя смеси должна превышать ширину щели примерно в 12 раз. Если использовать поперечный размер детонационной ячейки λ , то минимальная высота слоя такой смеси в экспериментах составила $\sim 150\lambda$. По сравнению с экспериментами с предварительно подготовленной горючей смесью критическая высота слоя оказалась на 20% больше, что объясняется конечной скоростью смесеобразования. С увеличением степени разбавления кислорода азотом критическая высота слоя увеличивается, а роль конечной скорости смесеобразования снижается: результаты перестают зависеть от способа формирования горючей смеси.

Ключевые слова: непрерывно-детонационный двигатель; щелевая камера сгорания; переход горения в детонацию; этиленокислородная смесь; минимальная высота слоя горючей смеси

DOI: 10.30826/CE23160405

EDN: FANEDD

Литература

1. Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propul. Power, 2006. Vol. 22. P. 1204–1216.
2. Rankin B. A., Fotia M. L., Naples A. G., Stevens C. A., Hoke J. L., Kaemming T. A., Theuerkauf S. W., Schauer F. R. Overview of performance, application, and analysis of rotating detonation engine technologies // J. Propul. Power, 2017. Vol. 33. No. 1. P. 131–143. doi: 10.2514/1.B36303.
3. Zhou R., Wu D., Wang J.-P. Progress of continuously rotating detonation engines // Chinese J. Aeronaut., 2016. Vol. 29. No. 1. P. 15–29. doi: 10.1016/j.cja.2015.12.006.
4. Anand V., Gutmark E. Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities // Prog. Energ. Combust., 2019. Vol. 73. P. 182–234.
5. Wang G., Liu W., Liu S., et al. Experimental verification of cylindrical air-breathing continuous rotating detonation engine fueled by non-premixed ethylene // Acta Astronaut., 2021. Vol. 189. P. 722–732.
6. Heister S. D., Smallwood J., Harroun A., Dille K., Martinez A., Ballintyn N. Rotating detonation combustion for advanced liquid propellant space engines // Aerospace, 2022. Vol. 9. P. 581. doi: 10.3390/aerospace9100581.
7. Lee J. H. S. The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: The Cambridge University Press, 2008. 400 p.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (гос. контракт № 13.1902.21.0014-продолжение, соглашение № 075-15-2020-806).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.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; НИЯУ «МИФИ», vaksenov@mail.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, gusevPA@yandex.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; НИЯУ МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

8. Shamshin I. O., Ivanov V. S., Aksenov V. S., Gusev P. A., Frolov S. M. Experimental study of the initial stage of the operation process in detonation rocket and air-breathing engines // *Advances in detonation research* / Ed. S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2022. P. 17–20. doi: 10.30826/ICPCD13A07.
9. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. Акад. наук СССР, 1959. Т. 129. С. 1254–1256.
10. Sommers W. P., Morrison R. B. Simulation of condensed-explosive detonation phenomena with gases // *Phys. Fluids*, 1962. Vol. 5. P. 241–248. doi: 10.1063/1.1706602.
11. Dabora E. K., Nicholls J. A., Morrison R. B. The influence of a compressible boundary on the propagation of gaseous detonations // *P. Combust. Inst.*, 1965. Vol. 10. No. 1. P. 817–830. doi: 10.1016/s0082-0784(65)80225-9.
12. Adams T. G. Do weak detonation waves exist? // *AIAA J.*, 1978. Vol. 16. No. 10. P. 1035–1040. doi: 10.2514/3.61001.
13. Иванов М. Ф., Фортвов В. Е., Борисов А. А. Численное моделирование развития детонации в газовых объемах конечной толщины // *Физика горения и взрыва*, 1981. № 3. С. 108–116.
14. Reynaud M., Virot F., Chinnayya A. A computational study of the interaction of gaseous detonations with a compressible layer // *Phys. Fluids*, 2017. Vol. 29. 056101. doi: 10.1063/1.4982659.
15. Liu J. C., Liou J. J., Sichel M., Kauffman C. W., Nicholls J. A. Diffraction and transmission of a detonation into a bounding explosive layer // *P. Combust. Inst.*, 1988. Vol. 21. P. 1639–1647. doi: 10.1016/s0082-078480397-7.
16. Oran E. S., Jones D. A., Sichel M. Numerical simulation of detonation transmission // *Proc. R. Soc. Lon. Ser. A*, 1992. Vol. 436. P. 267–297. doi: 10.1098/rspa.1992.0018.
17. Tonello N. A., Sichel M., Kauffman C. W. Mechanisms of detonation transmission in layered H₂–O₂ mixtures // *Shock Waves*, 1995. Vol. 5. P. 225–238. doi: 10.1007/bf01419004.
18. Ishii K., Kojima M. Propagation of detonation in mixtures with concentration gradients // *Application of detonation to propulsion* / Eds. G. Roy, S. Frolov, J. Shepherd. — Moscow: TORUS PRESS, 2004. P. 32–37.
19. Calhoon W., Sinha N. Detonation wave propagation in concentration gradients. AIAA Paper No. 2005-1167, 2005. doi: 10.2514/6.2005-1167.
20. Ishii K., Kojima M. Behavior of detonation propagation in mixtures with concentration gradients // *Shock Waves*, 2007. Vol. 17. P. 95–102. doi: 10.1007/s00193-007-0093-y.
21. Kessler D. A., Gamezo V. N., Oran E. S. Gas-phase detonation propagation in mixture composition gradients // *Philos. T. R. Soc. A*, 2012. Vol. 370. P. 567–596. doi: 10.1098/rsta.2011.0342.
22. Houim R. W., Fievisohn R. T. The influence of acoustic impedance on gaseous layered detonations bounded by an inert gas // *Combust. Flame*, 2017. Vol. 179. P. 185–198. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.02.001.
23. Rudy W., Kuznetsov M., Porowski R., Teodorczyk A., Grune J., Sempert K. Critical conditions of hydrogen–air detonation in partially confined geometry // *P. Combust. Inst.*, 2013. Vol. 34. P. 965–1972. doi: 10.1016/j.proci.2012.07.019.
24. Kuznetsov M., Yanez J., Grune J., Friedrich A., Jordan T. Hydrogen combustion in a flat semiconfined layer with respect to the Fukushima Daiichi accident // *Nucl. Eng. Des.*, 2015. Vol. 286. P. 36–48. doi: 10.1016/j.nucengdes.2015.01.016.
25. Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., Jordan T. Experimental investigation of hydrogen–air deflagrations and detonations in semiconfined flat layers // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2013. Vol. 26. P. 317–323. doi: 10.1016/j.jlpp.2011.09.008.
26. Shamshin I. O., Ivanov V. S., Aksenov V. S., Gusev P. A., Frolov S. M. Deflagration-to-detonation transition in a semi-confined slit combustor filled with nitrogen diluted ethylene–oxygen mixture // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 1098. doi: 10.3390/en16031098.
27. Ivanov V. S., Shamshin I. O., Frolov S. M. Computational study of deflagration-to-detonation transition in a semi-confined slit combustor // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 7028. doi: 10.3390/en16207028.
28. Lemcherfi A., Geiji R. M., Ayers Z. M., Plaehn E. W., Perkins H. D., Roy S., Meyer T. R., Fugger C. A., Slabaugh C. D. Effect of injection dynamics on detonation wave propagation in a linear detonation combustor // *P. Combust. Inst.*, 2023. P. 2875–2883. doi: 10.1016/j.proci.2022.08.004.
29. Liu H., Jin D. Characteristics of injection scheme in linearized RDE // *Int. J. Aeronaut. Space*, 2023. Vol. 24. P. 459–466. doi: 10.1007/s42405-022-00530-y.
30. Shi L., Fan E., Shen H., Wen C.-Y., Shang S., Hu H. Numerical study of the effects of injection conditions on rotating detonation engine propulsive performance // *Aerospace*, 2023. Vol. 10. P. 879. doi: 10.3390/aerospace10100879.
31. Wang Y., Tian C., Yang P. Effects of ozone addition on multi-wave modes of hydrogen–air rotating detonations // *Aerospace*, 2023. Vol. 10. P. 443. doi: 10.3390/aerospace10050443.
32. Zhou J., Song F., Xu S., Yang X., Zheng Y. Investigation of rotating detonation fueled by liquid kerosene // *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 4483. doi: 10.3390/en15124483.
33. Kato Y., Ishihara K., Matsuoka K., Kasahara J., Matsuo A., Funaki I. Study of combustion chamber characteristic length in rotating detonation engine with convergent–divergent nozzle. AIAA Paper No. 2016-1406, 2016.
34. Wilhite J., Driscoll R., George A. S., Anand V., Gutmark E. J. Investigation of a rotating detonation engine using ethylene–air mixtures. AIAA Paper No. 2016-1650, 2016.
35. Hansmetzger S., Zitoun R., Vidal P. Detonation regimes in a small-scale RDE // 26th Colloquium (International) on Dynamics of Explosions and Reactive Systems Proceedings. — Boston, MA, USA, 2017. 6 p.
36. Han H.-S., Lee E. S., Choi J.-Y. Experimental investigation of detonation propagation modes and thrust performance in a small rotating detonation engine using C₂H₄/O₂ propellant // *Energies*, 2021. Vol. 14. P. 1381. doi: 10.3390/en14051381.

37. *Taguchi T., Yamaguchi M., Matsuoka K., et al.* Investigation of reflective shuttling detonation cycle by schlieren and chemiluminescence photography // *Combust. Flame*, 2022. Vol. 236. P. 111826. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111826.
38. *Nettleton M. A.* Gaseous detonations. — London, U.K.: Chapman and Hall, 1987. 270 p.
39. *Matsui H., Lee J. H. S.* On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel–oxygen and air mixtures // *P. Combust. Inst.*, 1979. Vol. 17. No. 1. P. 1269–1280. doi: 10.1016/S0082-0784(79)80120-4.
40. *Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H. S.* The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits // *P. Combust. Inst.*, 1981. Vol. 18. No. 1. P. 1615–1622. doi: 10.1016/S0082-0784(81)80165-8.
41. *Thomas G. O.* Flame acceleration and the development of detonation in fuel–oxygen mixtures at elevated temperature and pressures // *J. Hazard. Mater.*, 2009. Vol. 163. P. 783–794.
42. *Wu Ming-Hsun, Kuo Wei-Chun.* Transmission of near-limit detonation wave through a planar sudden expansion in a narrow channel // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. No. 11. P. 3414–3422. doi: 10.1016/j.combustflame.2012.06.006.
43. *Kawasaki A., Kasahara J.* A novel characteristic length of detonation relevant to supercritical diffraction // *Shock Waves*, 2020. Vol. 30. P. 1–12. doi: 10.1007/s00193-019-00890-7.
44. *Зельдович Я. Б., Копанец А. С.* Теория детонации. — М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.

Поступила в редакцию 29.09.2023