ПЕРЕХОД УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИЮ В ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ЖИДКОГО ТРИЭТИЛАЛЮМИНИЯ С ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ*

С. М. Фролов¹, И. О. Шамшин², К. А. Бырдин³, К. А. Авдеев⁴, В. С. Аксёнов⁵, П. А. Стороженко⁶, Ш. Л. Гусейнов⁷

Аннотация: Представлено экспериментальное доказательство возможности перехода ударной волны (УВ) в детонацию (ПУВД) в двухфазной смеси жидкого триэтилалюминия (ТЭА, $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) — пирофорного материала, реагирующего с водой, — и перегретого водяного пара в ударной трубе. Показано, что тонкая синхронизация впрыска ТЭА в поток перегретого водяного пара с приходом затухающей УВ приводит к ее усилению с последующим распространением с почти постоянной скоростью 1500–1700 (при относительно малой дозе впрыска ТЭА) и 2000–2300 м/с (при относительно большой дозе впрыска ТЭА) в трубе в течение определенного интервала времени. Эти уровни скоростей согласуются с термодинамическими расчетами скорости детонации в бедной и близкой к стехиометрической смесях ТЭА — перегретый водяной пар соответственно. При введении большой дозы ТЭА профили давления в УВ напоминают профили давления в детонационных волнах в газовых и двухфазных топливно-воздушных смесях.

Ключевые слова: ударная волна; перегретый водяной пар; жидкий триэтилалюминий; химическое энерговыделение; усиление ударной волны; переход ударной волны в детонацию

DOI: 10.30826/CE25180107

EDN: IKKDXR

Литература

- Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust., 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672. doi: 10.1016/j.peccs.2004.05.001.
- Bykovskii F. A., Zhdan S. A., Vedernikov E. F. Continuous spin detonations // J. Propul. Power, 2006. Vol. 22. No. 6. P. 1204–1216. doi: 10.2514/1.17656.
- Frolov S. M., Platonov S. V., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Zangiev A. E., Sadykov I. A., Tukhvatullina R. R., Frolov F. S., Shamshin I. O. Pulsed combustion of fuel–air mixture in a cavity above water surface: Modeling and experiments // Shock Waves, 2022. Vol. 32. No. 1. P. 1–10. doi: 10.1007/s00193-021-01045-3.
- Frolov S. M., Platonov S. V., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Zangiev A. E., Sadykov I. A., Tukhvatullina R. R., Frolov F. S., Shamshin I. O. Pulsed combustion of fuel–air mixture in a cavity under the boat bottom: Modeling and experiments // Shock Waves, 2022. Vol. 32. No. 1. P. 11–24. doi: 10.1007/s00193-021-01046-2.
- Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Frolov F. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R. Pulsed detonation hydromramjet: Simulations and experiments // Shock Waves, 2020. Vol. 30. No. 3. P. 221–234. doi: 10.1007/s00193-019-00906-2.
- Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Frolov F. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O. Pulsed detonation hydromramjet: Design optimization // J. Marine Science Engineering, 2022. Vol. 10. P. 1171. doi: 10.3390/jmse10091171.
- Byrdin K. A., Frolov S. M., Storozenko P. A., Guseinov S. L. Thermochemical study of the detonation properties of boron- and aluminum-containing compounds in air and water // Shock Waves, 2023. Vol. 33. P. 501–520. doi: 10.1007/s00193-023-01150-5.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-543 от 24 апреля 2024 г.).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН); Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

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

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

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

⁶АО «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементарных соединений», bigpastor@mail.ru

⁷АО «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементарных соединений», rejhan@bk.ru

8. Бырдин К. А., Фролов С. М., Стороженко П. А., Гусейнов Ш. Л. Детонационная способность бор- и алюминий-содержащих соединений в воздухе, воде и диоксиде углерода // Горение и взрыв, 2023. Т. 16. № 2. С. 50–70. doi: 10.30826/CE23160205.
9. Seedhouse E. SpaceX: Starship to Mars — the first 20 years. — Springer praxis books ser. — Cham, Switzerland: Springer, 2022. 231 p.
10. Billig F. S. A study of combustion in supersonic streams: D.Sc. Diss. — College Park, MD, USA: University of Maryland, 1964. 68 p.
11. Frolov S. M., Basevich V. Y., Belyaev A. A., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Frolov F. S., Storozhenko P. A., Guseinov S. L. Kinetic model and experiment for self-ignition of triethylaluminum and triethylborane droplets in air // Micromachines, 2022. Vol. 13. P. 2033. doi: 10.3390/mi13112033.
12. Кузнецов Н. М., Фролов С. М., Шамшин И. О., Стороженко П. А. Кинетика взаимодействия капель триэтилалюминия с перегретым водяным паром: эксперимент, физико-химическая модель и схема химических реакций // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 3. С. 76–81. doi: 10.30826/CE20130307.
13. Фролов С. М., Аксенов В. С., Басевич В. Я. Иницирование детонации при взаимодействии ударной волны с зоной форкамерно-факельного зажигания // Докл. Акад. наук, 2006. Т. 410. № 1. С. 70–74.
14. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 77–80.
15. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Optimization study of spray detonation initiation by electric discharge // Shock Waves, 2005. Vol. 14. No. 3. P. 175–186.
16. Фролов С. М., Шамшин И. О., Бырдин К. А., Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Стороженко П. А., Гусейнов Ш. Л. Усиление ударной волны в двухфазной смеси перегретого водяного пара и жидкого триэтилалюминия // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 2. С. 80–91. doi: 10.30826/CE24170208.

Поступила в редакцию 14.11.2024

После доработки 22.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025