

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ ДОБАВКАМИ ИНЕРТНЫХ КОМПОНЕНТ*

Д. А. Тропин¹

Аннотация: Проведено широкомасштабное теоретическое и численное исследование процессов воспламенения и детонации в газовых смесях с дисперсными компонентами (пористыми фильтрами, облаками инертных и реагирующих частиц, завесами жидких капель) с целью управления взрывными процессами, предотвращения и срыва детонации. Определено влияние параметров инертных и реагирующих частиц на процессы воспламенения реагирующих газовых смесей. Получены предельные концентрации частиц для предотвращения воспламенения. Установлен противоположный эффект воздействия частиц железа и угля на процессы воспламенения. Проведена классификация детонационных режимов взаимодействия детонационных волн (ДВ) с инертными компонентами. Найдены концентрационные и геометрические пределы детонации. Получены универсальные критерии срыва детонации, линейным образом связывающие диаметр и объемную концентрацию инертных компонент. Установлена неизменность концентрационных пределов при переходе от микроразмерных к наноразмерным инертным компонентам. Определены оптимальные конфигурации инертных компонент, приводящие к полному срыву ячеистой детонации. Установлено, что оптимальными для срыва детонации являются системы из двух фильтров, расположенных у стенок канала.

Ключевые слова: численное моделирование; ячеистая детонационная волна; инертные компоненты; ослабление детонации; срыв детонации

DOI: 10.30826/CE25180208

EDN: NINYDM

Литература

1. Yang H. N., Chen J. H., Chiu H. J., Kao T. J., Tsai H. Y., Chen J. R. Leak and explosion from an underground pipeline in Kaohsiung, Taiwan // *Loss Prevention Bulletin*, 2017. Vol. 257. P. 1–13.
2. McLain A. G., Jachimowski C. J., Rogers R. C. Ignition of $\text{SiH}_4\text{--H}_2\text{--O}_2\text{--N}_2$ behind reflected shock waves. NASA Technical Paper 2114, 1983.
3. Jachimowski C. J., McLain A. G. Chemical kinetic mechanism for the ignition of silane/hydrogen mixtures. NASA Technical Paper 2129, 1983.
4. Petersen E. L., Crofton M. W. Ignition and oxydation of dilute silane-oxydizer mixtures behind reflected shock waves. AIAA Paper No. 2002-3875, 2002.
5. Тропин Д. А., Федоров А. В. Воспламенение двухтопливной смеси водород/силан в воздухе // *Физика горения и взрыва*, 2017. Т. 53. № 1. С. 3–10.
6. Radulescu M. I., Lee J. H. S. The failure mechanism of gaseous detonations: Experiments in porous wall tubes // *Combust. Flame*, 2002. Vol. 131. No. 1-2. P. 29–46.
7. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Attenuation and recovery of detonation wave after passing through acoustically absorbing section in hydrogen–air mixture at atmospheric pressure // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2016. Vol. 43. P. 311–314.
8. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Detonation suppression in hydrogen–air mixtures using porous coatings on the walls // *Shock Waves*, 2018. Vol. 28. No. 5. P. 1011–1018.
9. Wolanski P., Liu J. C., Kauffman C. W., Nicholls J. A., Sichel M. The effect of inert particles in methane–air detonation // *Archivum Combustionis*, 1988. Vol. 8. No. 1. P. 15–32.
10. Fomin P. A., Chen J.-R. Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas // *Combust. Sci. Technol.*, 2009. Vol. 181. No. 8. P. 1038–1064.
11. Gottiparthi K. C., Menon S. A study of interaction of clouds of inert particles with detonation in gases // *Combust. Sci. Technol.*, 2012. Vol. 184. No. 3. P. 406–433.
12. Shafiee H., Djavahreshkian M. H. CFD simulation of particles effects on characteristics of detonation // *Int. J. Computer Theory Engineering*, 2014. Vol. 6. No. 6. P. 466–471.
13. Pinaev A. V., Vasil'ev A. A., Pinaev P. A. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // *Shock Waves*, 2015. Vol. 25. No. 3. P. 267–275.
14. Николаев Ю. А., Фомин П. А. Модель стационарной гетерогенной детонации в газокapельной среде //

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>, а также в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер государственной регистрации 124021400037-4).

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, d.a.tropin@itam.nsc.ru

- Физика горения и взрыва, 1984. Т. 20. № 4. С. 97–105. EDN: ZIURPT.
15. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. Ослабление ударной волны в канале с проницаемыми стенками // Физика горения и взрыва, 1991. № 6. С. 101–106.
 16. Беликов В. В., Беликова Г. В., Головизнин В. М., Семенов В. Н., Стародубцева Л. П., Фокин А. Л. Подавление детонации в водородовоздушных смесях // Теплофизика высоких температур, 1995. Т. 33. № 3. С. 452–457.
 17. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. 336 с.
 18. Фёдоров А. В., Тропин Д. А. Моделирование прохождения детонационной волны через облако частиц в двухскоростной двухтемпературной постановке // Физика горения и взрыва, 2013. Т. 49. № 2. С. 61–70. EDN: PWVKRJ.
 19. Tropin D. A., Bedarev I. A. Problems of detonation wave suppression in hydrogen–air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation // Combust. Sci. Technol., 2021. Vol. 193. No. 2. P. 197–210.
 20. Тропин Д. А., Лаврук С. А. Физико-математическое моделирование ослабления гомогенных и гетерогенных детонационных волн облаками капель воды // Физика горения и взрыва, 2022. Т. 58. № 3. С. 80–90. doi: 10.15372/FGV20220308. EDN: DLKVJU.
 21. Бойко В. М., Киселев В. П., Киселев С. П., Папырин А. Н., Поплавский С. В., Фомин В. М. О взаимодействии ударной волны с облаком частиц // Физика горения и взрыва, 1996. Т. 32. № 2. С. 86–99.
 22. Filippov A. V., Rosner D. E. Energy transfer between an aerosol particle and gas at high temperature ratios in the Knudsen transition regime // Int. J. Heat Mass Tran., 2000. Vol. 43. No. 1. P. 127–138.
 23. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 37–63.
 24. Хмель Т. А., Федоров А. В. Моделирование плоских волн детонации в газозвеси наноразмерных частиц алюминия // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 2. С. 71–81.
 25. Тропин Д. А., Фёдоров А. В., Пенязьков О. Г., Лещевич В. В. Время задержки воспламенения метановоздушной смеси в присутствии частиц железа // Физика горения и взрыва, 2014. Т. 50. № 6. С. 11–20. EDN: SYTRYR.
 26. Федоров А. В., Шульгин А. В., Тропин Д. А. Расчет физико-химических превращений в смеси метан – железные частицы // Вестник НГУ. Сер. Физика, 2014. Т. 9. № 4. С. 74–79.
 27. Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Физико-математическое моделирование воспламенения гетерогенной смеси метан/водород/микрочастицы угля // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 6. С. 41–49. doi: 10.15372/FGV20180605. EDN: NLHSNQ.
 28. Tropin D. A., Bochenkov E. S. Influence of inert particles on the ignition processes of hydrogen–silane–air mixtures // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. No. 35. P. 17953–17960.
 29. Tien J. H., Stalker R. J. Release of chemical energy by combustion in a supersonic mixing layer of hydrogen and air // Combust. Flame, 2002. Vol. 131. No. 3. P. 329–348.
 30. Бедарев И. А., Рылова К. В., Фёдоров А. В. Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородовоздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 5. С. 22–33. doi: 10.15372/FGV20150503. EDN: UMUJFX.
 31. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва, 2006. Т. 42. № 1. С. 26–33.
 32. Федоров А. В., Тропин Д. А., Бедарев И. А. Математическое моделирование подавления детонации водород-кислородной смеси инертными частицами // Физика горения и взрыва, 2010. Т. 46. № 3. С. 103–115.
 33. Бедарев И. А., Рылова К. В., Федоров А. В. Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водород-воздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 5. С. 22–33.
 34. Бедарев И. А., Темербеков В. М., Федоров А. В. Моделирование режимов наклонных детонационных волн, возникающих при инициировании детонации снарядом малого диаметра // Теплофизика и аэромеханика, 2019. Т. 26. № 1. С. 63–73.
 35. Bedarev I., Temerbekov V. Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen–oxygen mixture by a high velocity projectile // Therm. Sci., 2021. Vol. 25. No. 5B. P. 3889–3897.
 36. Вестбрук Ч., Уртъев П. Применение химической кинетики для определения критических параметров газовой детонации // Физика горения и взрыва, 1983. № 6. С. 65–76.
 37. Тропин Д. А., Федоров А. В. Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан–кислород и метан–водород–кислород // Физика горения и взрыва, 2014. Т. 50. № 5. С. 48–52.
 38. Britten J. A., Tong J., Westbrook C. K. A numerical study of silane combustion // 23rd Symposium (International) on Combustion. — Pittsburg, PA, USA: The Combustion Institute, 1990. P. 195–202.
 39. Тропин Д. А., Федоров А. В. Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 4. С. 37–45.
 40. Тропин Д. А., Федоров А. В. Расчет пределов воспламенения смесей силан–кислород и силан–воздух // Физика горения и взрыва, 2016. Т. 52. № 1. С. 46–51.
 41. Лещевич В. В., Пенязьков О. Г., Шимченко С. Ю. Воспламенение метановоздушной смеси в присутствии угольной пыли при температурах 800–1200 К // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 3. С. 29–35.

42. Ng H. D., Radulescu M. I., Higgins A. J., Nikiforakis N., Lee J. H. S. Numerical investigation of the instability for one-dimensional Chapman–Jouguet detonations with chain-branching kinetics // *Combust. Theor. Model.*, 2005. Vol. 9. No. 3. P. 385–401.
43. Tang-Yuk K. C., Lee J. H. S., Ng H. D., Deiterding R., Mi X. The re-initiation of cellular detonations downstream of an inert layer // *P. Combust. Inst.*, 2023. Vol. 39. No. 3. P. 3127–3135.
44. Xu Y., Zhang P., Meng Q., Li S., Zhang H. Transmission of hydrogen detonation across a curtain of dilute inert particles // *Combust. Flame*, 2023. Vol. 254. P. 112834.
45. Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачёв А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис А. В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // *Физика горения и взрыва*, 2017. Т. 53. № 1. С. 11–18. doi: 10.15372/FGV20170102. EDN: XRPDIN.
46. Poplavski S. V., Minakov A. V., Shebeleva A. A., Boyko V. M. On the interaction of water droplet with a shock wave: Experiment and numerical simulation // *Int. J. Multiphas. Flow*, 2020. Vol. 127. P. 103273.
47. Chen Z., Fan B., Jiang X. Suppression effects of powder suppressants on the explosions of oxyhydrogen gas // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2006. Vol. 19. No. 6. P. 648–655.
48. Xu Y., Zhao M., Zhang H. Extinction of incident hydrogen/air detonation in fine water sprays // *Phys. Fluids*, 2021. Vol. 33. No. 11. P. 116109.

Поступила в редакцию 30.11.2024

После доработки 27.01.2025

Принята к публикации 04.02.2025