

ВЛИЯНИЕ ОБЛАКОВ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ И СТРУКТУРЫ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ*

С. А. Лаврук¹, Т. А. Хмель²

Аннотация: Исследование направлено на выявление основных механизмов распространения гибридной детонации в бедной ($\varphi = 0,6$) водородно-воздушной смеси с частицами алюминия. Методами численного моделирования анализируются процессы взаимодействия установившихся плоских или ячеистых детонационных волн с облаками алюминиевых частиц конечной протяженности. При регуляризации детонационной структуры в облаке структуры остаются стабильными (с регулярной ячейкой) некоторое время после выхода из облака. Установлено увеличение зоны сохранения регулярности с увеличением плотности облака. Проведено сопоставление длин зон стабильности в одномерной и двумерной постановках.

Ключевые слова: математическое моделирование; гибридная детонация; водородно-воздушные смеси; частицы алюминия; конечные облака

DOI: 10.30826/CE24170408

EDN: FZXIBJ

Литература

1. Golovastov S. V., Bivol G. Y., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019. Vol. 100. P. 124–134. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.08.030.
2. 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. doi: 10.1016/S0010-2180(02)00390-5.
3. Radulescu M. I., Maxwell B. M. N. The mechanism of detonation attenuation by a porous medium and its subsequent re-initiation // *J. Fluid Mech.*, 2011. No. 667. P. 96–134. doi: 10.1017/S0022112010004386.
4. Фёдоров А. В., Тропин Д. А. Определение критического размера облака частиц, необходимого для подавления газовой детонации // *Физика горения и взрыва*, 2011. Т. 47. № 4. С. 100–108. EDN: OHSQZT.
5. Tropin D., Temerbekov V. Numerical simulation of detonation wave propagation through a rigid permeable barrier // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2022. Vol. 47. No. 87. P. 37106–37124. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.256.
6. Тропин Д. А., Лаврук С. А. Физико-математическое моделирование ослабления однородных и гетерогенных детонационных волн облаками капель воды // *Физика горения и взрыва*, 2022. Т. 58. № 3. С. 80–90. doi: 10.15372/FGV20220308. EDN: DLKVJU.
7. Tropin D., Vyshegorodcev K. Numerical simulation of interaction of cellular detonation wave with systems of inert porous filters // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2023. Vol. 48. No. 48. P. 18454–18485. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.209.
8. Khasainov B. A., Veyssiere B. Steady, plane, double-front detonations in gaseous detonable mixtures containing a suspension of aluminum particles // *Dynamics of explosions* / Eds. A. Borisov, A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyrer. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — AIAA, 1988. P. 284–299. doi: 10.2514/5.9781600865886.0284.0299.
9. Khasainov B. A., Veyssiere B. Initiation of detonation regimes in hybrid two-phase mixtures // *Shock Waves*, 1996. Vol. 6. P. 9–15. doi: 10.1007/BF02511399.
10. Veyssiere B., Ingnoli W. Existence of the detonation cellular structure in two-phase hybrid mixtures // *Shock Waves*, 2003. Vol. 12. No. 4. P. 291–299. doi: 10.1007/s00193-002-0168-8.
11. Khasainov B. A., Veyssiere B., Ingnoli W. Numerical simulation of detonation cell structure in hydrogen–air mixture loaded by aluminum particles // *High-speed deflagration and detonation: Fundamentals and control* / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, D. W. Netzer, A. A. Borisov. — Moscow: Elex-KM Pubs., 2001. P. 163–174.
12. Wu W., Wang Y., Wu K., Ma Z., Han W., Wang J., Wang G., Zhang M. Experimental evaluation of aluminum powder fuel in a hydrogen/oxygen detonation tube // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2023. Vol. 48. No. 62. P. 24089–24100. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.078.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-29-00336 (<https://rscf.ru/project/24-29-00336/>). Статья основана на докладе, представленном на 11-м Международном симпозиуме по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (NEPCAR), прошедшем в Сочи (Россия) в период с 7 по 11 октября 2024 г.

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

²Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, khmel@itam.nsc.ru

13. Хмель Т. А., Лаврук С. А., Афанасенков А. А. Распространение гибридной детонации в водород-кислородной смеси с частицами алюминия в канале с расширением // Челябинский физико-математический ж., 2023. Т. 8. № 3. С. 371–386. doi: 10.47475/2500-0101-2023-8-3-371-386.
14. Хмель Т. А., Лаврук С. А. Структура и распространение волн Чепмена–Жуге в водород-кислородной смеси с частицами алюминия // Челябинский физико-математический ж., 2023. Т. 8. № 4. С. 580–593. doi: 10.47475/2500-0101-2023-8-4-580-593.
15. Хмель Т. А., Лаврук С. А. Моделирование течений ячеистой детонации в смеси водород–кислород–аргон с частицами алюминия // Физика горения и взрыва, 2024. Т. 60. № 3. С. 104–116. doi: 10.15372/fgv2023.9298.
16. Khmel T. A., Lavruk S. A. Development of a model of hybrid detonation in a mixture of oxygen–hydrogen–argon with aluminum particles // Горение и взрыв, 2023. Т. 16. № 1. С. 63–69. doi: 10.30826/CE23160107.
17. 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: UMJFX.
18. 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. Iss. 5. Part B. P. 3889–3897. doi: 10.2298/TSCI210115180B.
19. Bedarev I. A., Temerbekov V. M. Modeling of attenuation and suppression of cellular detonation in the hydrogen–air mixture by circular obstacles // Int. J. Hydrogen Energ., 2022. Vol. 47. No. 90. P. 38455–38467. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.307.
20. Фёдоров А. В. Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва, 1992. Т. 28. № 3. С. 72–83. EDN: XWFPCR.
21. Фёдоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва, 2005. Т. 41. № 4. С. 84–98. EDN: NXVFDT.
22. Хмель Т. А. Моделирование ячеистой детонации в газовзвесьях субмикронных и наноразмерных частиц алюминия // Физика горения и взрыва, 2019. Т. 55. № 5. С. 73–82. doi: 10.15372/FGV20190509. EDN: LSFURA.
23. Strauss W. A. Investigation of the detonation of aluminum powder–oxygen mixtures // AIAA J., 1968. Vol. 6. No. 9. P. 1753–1756.
24. Lavruk S. A., Khmel T. A. Regimes and critical conditions of detonation propagation in expanding channels in gas suspensions of ultrafine aluminum particles // J. Loss Prevent. Proc., 2021. No. 71. P. 104476. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104476.
25. Khmel T. A., Lavruk S. A. Detonation flows in aluminium particle gas suspensions, inhomogeneous in concentrations // J. Loss Prevent. Proc., 2021. No. 72. P. 104522. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104522.
26. Хмель Т. А., Лаврук С. А. Моделирование ячеистой детонации в газовзвесьях субмикронных частиц алюминия с различными распределениями концентрации // Физика горения и взрыва, 2022. Т. 58. № 3. С. 3–18. doi: 10.15372/FGV20220301. EDN: POBAYY.
27. Tropin D. A., Lavruk S. A. Numerical simulation of the interaction of heterogeneous detonation with the porous insert of different geometry // Горение и взрыв, 2023. Т. 16. № 1. С. 70–75. doi: 10.30826/CE23160108.
28. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 37–63. EDN: TQUWMP.
29. Старик А. М., Савельев А. М., Титова Н. С. Особенности воспламенения и горения композитных топлив, содержащих наночастицы алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 64–91. EDN: TQUWMZ.
30. Афанасенков А. А., Хмель Т. А. Валидация модели гибридной детонации водород-воздушных смесей с частицами алюминия // Челябинский физико-математический ж., 2024. Т. 9. № 4. С. 177–186. doi: 10.47475/2500-0101-2024-9-2-177-186.
31. Ciccarelli G., Ginsberg T., Boccio J., Economos C., Sato K., Kinoshita M. Detonation cell size measurements and predictions in hydrogen–air–steam mixtures at elevated temperatures // Combust. Flame, 1994. Vol. 99. No. 2. P. 212–220. doi: 10.1016/0010-2180(94)90124-4.
32. Ciccarelli G., Ginsburg T., Boccio J., Economos C., Finfrock C., Gerlach L., Sato K., Kinoshita M. High-temperature hydrogen–air–steam detonation experiments in the BNL small-scale development apparatus. — Upton, NY, USA: Brookhaven National Lab., 1994. 104 p.
33. Hosoda H., Hayashi A. K., Yamada E. Numerical analysis on combustion characteristics of nano aluminum particle–oxygen two-phase detonation // Sci. Technol. Eng. Ma., 2013. Vol. 74. No. 1–2. P. 34–40.
34. 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.
35. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys., 1983. Vol. 49. No. 3. P. 357–393. doi: 10.1016/0021-9991(83)90136-5.
36. Roache P. J. Computational fluid dynamics. — Albuquerque, NM, USA: Hermosa Publs., 1976. 446 p.
37. Хмель Т. А., Лаврук С. А. Влияние добавки нанодисперсных частиц алюминия на характеристики детонации водородно-воздушных смесей // Письма в ЖТФ, 2024. Vol. 50. № 8. С. 38–40. doi: 10.61011/PJTF.2024.08.57519.19832.

Поступила в редакцию 31.07.2024