

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ*

С. А. Лаврук, Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Аннотация: Предложена физико-математическая модель в одномерной и двумерной постановке, описывающая процесс взаимодействия гетерогенной детонационной волны с полубесконечной пористой вставкой. Выявлены основные режимы распространения детонации: распространение затухающей ячеистой детонационной волны со скоростями меньше скорости Чепмена–Жуге при концентрациях цилиндров меньше критической и срыв детонации с разрушением ячеистой структуры при концентрациях цилиндров, равных или превышающих критическую. Построена карта режимов распространения гетерогенной детонации стехиометрической смеси частиц алюминия диаметром 1, 2 и 3,5 мкм в кислороде в пористой зоне с цилиндрами диаметром 100 мкм. Получены критические условия распространения гетерогенной детонации в стехиометрической смеси 1, 2 и 3,5 мкм. Показано, что с увеличением размера горящих частиц от 1 до 3,5 мкм критическая объемная концентрация уменьшается. Результаты сравнения одномерных и двумерных расчетов показывают, что они похожи друг на друга.

Ключевые слова: физическо-математическое моделирование; гетерогенная детонация; пористые вставки; срыв детонации

DOI: 10.30826/CE22150307

EDN: JIRNG

Литература

1. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. Ослабление ударной волны в канале с проницаемыми стенками // Физика горения и взрыва, 1991. № 6. С. 101–106.
2. Papalexandris M. V. Influence of inert particles on the propagation of multidimensional detonation waves // Combust. Flame, 2005. Vol. 141. No. 3. P. 216–228.
3. Tahsini A. M. Detonation wave attenuation in dust-free and dusty air // J. Loss Prevent. Proc., 2016. Vol. 39. P. 24–29.
4. Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Ослабление и подавление детонационных волн в реагирующих газовых смесях облаками инертных микро- и наночастиц // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 2. С. 82–88. doi: 10.15372/FGV20180209.
5. Тропин Д. А., Фёдоров А. В. Влияние инертных микро- и наночастиц на параметры детонационных волн в силановодородовоздушных смесях // Физика горения и взрыва, 2019. Т. 55. № 2. С. 119–126. doi: 10.15372/FGV20190212.
6. Bedarev I. Micro-level modeling of the detonation wave attenuation by inert particles // Therm. Sci., 2019. Vol. 23. P. 439–445.
7. Woliński M., Wolański P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Archivum Combustionis, 1987. Vol. 7. No. 3/4. P. 353–370.
8. Wolański P., Liu J. C., Kaufman 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.
9. Pinaev A. V., Vasilev 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.
10. Lin Yu-Jhen, Wang Sheng-Hsun, Liu Chien-Ho, Tsai Hsiao-Yun, Chen Jenq-Renn. Suppression of flame propagation in a long duct by an inert gas plug // 11th Asia-Pacific Conference on Combustion. Sydney, NSW, Australia: The University of Sydney, 2017. Vol. 77. P. 247–252.
11. Mawhinney J. R., Darwin R. Protecting against vapor explosions with water mist // Halon Options Technical Working Conference Proceedings, 2000. P. 215–226.
12. Evans M. W., Given F. I., Richeson W. E. Effects of attenuating materials on detonation induction distances in gases // J. Appl. Phys., 1955. Vol. 26. No. 9. P. 1111–1113.
13. Васильев А. А. Околопредельные режимы детонации в каналах с пористыми стенками // Физика горения и взрыва, 1994. № 1. С. 101–106.
14. 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.
15. 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.
16. Golovastov S. V., Bivol G. Y., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when

*Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 21-79-10083 (<https://rscf.ru/project/21-79-10083/>). Статья основана на докладе, представленном на 13-м Международном коллоквиуме по импульсной и непрерывной детонации (ICPCD), прошедшем в Санкт-Петербурге (Россия) в период с 18 по 21 апреля 2022 г.

- passing along a porous coating // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019. Vol. 100. P. 124–134.
17. 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. Vol. 667. P. 96–134.
 18. Бедарев И. А., Темербеков В. М. Двумерное моделирование ослабления детонационной волны при ее прохождении через область с круговыми препятствиями // *Письма в ЖТФ*, 2021. Т. 47. № 14. С. 8–10. doi: 10.21883/PJTF.2021.14.51178.18627.
 19. Bu Y., Li C., Amyotte P., Yuan W., Yuan C., Li G. Moderation of Al dust explosions by micro- and nano-sized Al_2O_3 powder // *J. Hazard. Mater.*, 2020. Vol. 381. P. 120968.
 20. Zhang Shulin, Bi Mingshu, Jiang Haipeng, Gao Wei. Suppression effect of inert gases on aluminum dust explosion // *Powder Technol.*, 2021. Vol. 388. P. 90–99.
 21. Ju Y., Law C. K. Propagation and quenching of detonation waves in particle laden mixtures // *Combust. Flame*, 2002. Vol. 129. No. 4. P. 356–364.
 22. Фёдоров Ф. В., Крацова Ю. В. Расчет распространения детонационной волны в газозвеси алюминиевых и инертных частиц // *Физика горения и взрыва*, 2013. Т. 49. № 3. С. 88–101.
 23. Kratova Y., Kashkovsky A., Shershnev A. Numerical simulation of shock wave propagation in 2-D channels with obstacles filled with chemically reacting gas suspensions // *Therm. Sci.*, 2019. Vol. 23. P. 623–630.
 24. Lavruk S. Investigation of detonation suppression in aluminum suspensions of micro- and nanoparticles by inert particle clouds // *AIP Conf. Proc.*, 2019. Vol. 2125. P. 1–6.
 25. 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.
 26. Khmel T. A., Lavruk S. A. Detonation flows in aluminium particle gas suspensions, inhomogeneous in concentrations // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2021. Vol. 72. P. 104522.
 27. Фёдоров А. В. Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // *Физика горения и взрыва*, 1992. Т. 28. № 3. С. 72–83.
 28. Fedorov A. V., Khmel T. A., Fomin V. M. Non-equilibrium model of steady detonations in aluminum particles — oxygen suspensions // *Shock Waves*, 1999. Vol. 9. No. 5. P. 313–318.
 29. Lavruk S. A., Fedorov A. V., Khmel T. A. Cellular detonation propagation and degeneration in bi-disperse gas suspensions of micron- and nano-sized aluminum particles // *Shock Waves*, 2020. Vol. 30. No. 3. P. 273–286.
 30. Хмель Т. А. Моделирование ячеистой детонации в газозвесах субмикронных и наноразмерных частиц алюминия // *Физика горения и взрыва*, 2019. Т. 55. № 5. С. 73–82. doi: 10.15372/FGV20190509.
 31. 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. Вып. 3. С. 452–457.

Поступила в редакцию 21.01.2022