

УДВОЕНИЕ ПЕРИОДОВ И ПЕРЕХОД К ХАОСУ В ПУЛЬСИРУЮЩИХ РЕЖИМАХ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ*

В. Г. Крупкин¹, Г. Н. Мохин²

Аннотация: Известно, что стационарный режим распространения волны горения в конденсированных системах существует в ограниченной области параметров. Рассмотрены режимы пульсирующего горения конденсированных систем в области параметров неустойчивости фронта горения, распространяющегося в твердой фазе. Численными методами находилась зависимость мгновенной скорости фронта от времени. Моделирование показало, что при небольшом отклонении от границы существования стационарного режима периодические колебания скорости фронта возбуждаются по истечении некоторого периода индукции. В некотором диапазоне параметров возникают дупериодические, четырехпериодические и более сложные режимы аналогично известному механизму удвоения периода для простейших динамических систем с дискретным временем. Найдены границы значений параметров, отвечающие колебаниям с одним, двумя и четырьмя периодами. При дальнейшем удалении от границы устойчивости могут возникать малоисследованные в данных системах режимы со сменой характера периодичности, аналогичные исследуемым в теории динамических систем структурам, получившим название странного аттрактора. Показано, что для исследования таких режимов важно анализировать спектр частот колебаний. Для исследованных режимов приводятся спектры колебаний, в них выделяются характерные частоты пульсаций фронта. Обсуждаются сложности численного моделирования таких режимов, в том числе сильная зависимость результатов расчета от шага сетки и точности округления. Также отмечается важность длительного времени расчета для учета эффектов, связанных с иницированием фронта горячей стенкой и надежного выявления различных установившихся режимов.

Ключевые слова: теория горения; численное моделирование горения; пульсирующие режимы; удвоение периодов; странный аттрактор; переход к хаосу

DOI: 10.30826/CE25180409

EDN: PKJMMQ

Литература

1. Margolis S. B. The transition to nonsteady deflagration in gasless combustion // Prog. Energ. Combust., 1991. Vol. 17. No. 2. P. 135–162.
2. Мержанов А. Г., Мукасян А. С. Твердопламенное горение. — 2-е изд. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
3. Mukasyan A. S., Rogachev A. S. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures // Prog. Energ. Combust., 2008. Vol. 34. No. 3. P. 377–416.
4. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Физика горения и взрыва, 1971. Т. 7. № 1. С. 19–28. https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=157025&ARTICLE_ID=157034.
5. Matkowsky B. J., Sivashinsky G. I. Propagation of a pulsating reaction front in solid fuel combustion // SIAM J. Appl. Math., 1978. Vol. 35. No. 3. P. 465–478. doi: 10.1137/0135038.
6. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г. Представления о режимах распространения твердого пламени // Докл. Акад. наук, 2003. Т. 391. № 1. С. 62–64.
7. Илюхин В. С. Низкочастотные пульсации горения порохов в вакууме // Физика горения и взрыва, 1975. Т. 11. № 4. С. 660–662.
8. Bayliss A., Matkowsky B. J. 1990. Two routes to chaos in condensed phase combustion. // SIAM J. Appl. Math., 1990. Vol. 50. No. 2. P. 437–459.
9. Дрёмин А. Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке // Физика горения и взрыва, 2000. Т. 36. № 6. С. 31–44.
10. 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.pecs.2004.05.001.
11. Gubernov V., Kolobov A., Polezhaev A., Sidhu H., Mercer G. 2010. Period doubling and chaotic transient in a model of

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ «Химическая физика окисления, горения и взрыва», регистрационный номер № 1024040200065-4, и имела бюджетное финансирование.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова, Российской академии наук, krupkin@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова, Российской академии наук, mokhin@chph.ras.ru

- chain-branching combustion wave propagation // P. Roy. Soc. A — Math. Phys., 2010. Vol. 466. No. 2121. P. 2747–2769.
12. Крупкин В. Г., Мохин Г. Н. Пульсирующий режим горения подповерхностного слоя в гомогенных энергетических материалах // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 138–146.
 13. Matson A., Kagan L., Brauner C. M., Sivashinsky G., Gordon P. V. On dynamics of gasless combustion in slowly varying periodic media // Combust. Flame, 2024. Vol. 267. P. 113573. doi: 10.1016/j.combustflame.2024.113573.
 14. Wang Z., Huang Y., Yu K., et al. 2024. The topological characteristics of the bifurcation and chaos in the motion of combustion fronts in solids // Chaos, 2024. Vol. 34. No. 10. P. 113573. doi: 10.1063/5.0228827.
 15. Крупкин В. Г., Мохин Г. Н. Ускорение численных схем для моделирования задач пульсирующего горения с использованием новых возможностей языка C++ // Горение и взрыв, 2023. Т. 16. № 2. С. 73–79.
 16. Крупкин В. Г., Мохин Г. Н. Новые алгоритмы и структуры данных для эффективной реализации численных схем в стандарте языка программирования C++23 // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 1. С. 61–67.

Поступила в редакцию 02.01.2025

После доработки 21.04.2025

Принята к публикации 02.06.2025