ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №3. С. 106–114

ПРИМЕНЕНИЕ КАСКАДА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. С. Абруков[1], Д. А. Ануфриева[2], С. С. Кузьмин[3], Д. А. Саперов[4]

Аннотация: Представлены результаты моделирования детонационных характеристик высокоэнергетических материалов (ВЭМ) с помощью разработанного авторами метода каскада нейронных сетей (НС). В отличие от одиночных НС каскадное последовательное обучение трех сетей позволяет существенно снизить влияние случайных ошибок экспериментальных данных на качество моделей. Объектом исследования являлись индивидуальные и композиционные взрывчатые вещества (ВВ) (32 состава), для описания каждого из которых применялись 7 физико-химических параметров. Приведены показатели качества моделей. Показано, что созданные модели адекватно отражают фундаментальные физические закономерности.

Ключевые слова: высокоэнергетические материалы; характеристики детонации; нейронные сети; многофакторные вычислительные модели; каскад нейронных сетей; машинное обучение

DOI: 10.30826/CE26190310 **EDN:** GASDXF

Литература

1. *Ляшева С. А., Шлеймович М. П., Кирпичников А. П., Спицин А. Н.* Прогнозирование скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ с использованием нейронной сети // Вестник технологического университета, 2015. Т. 18. № 15. С. 226–229.
2. *Передерин Ю. В., Попок Н. И.* Количественный анализ и прогнозирование свойств компонентов энергетических конденсированных систем — бризантных взрывчатых веществ // Химическая физика и мезоскопия, 2019. Т. 21. № 2. С. 245–253.
3. *Мухутдинов А. Р., Ефимов М. Г., Вахидова З. Р.* Нейросетевое моделирование процесса детонации смеси гексида с инертными наполнителями // Информационные технологии и вычислительные системы, 2021. № 4. С. 83–90. doi: 10.14357/20718632210408.
4. *Abrukov S. V., Karlovich E. V., Afanasyev V. N., Semenov Y. V., Abrukov V.* Creation of propellant combustion models by means of data mining tools // Int. J. Energetic Materials Chemical Propulsion, 2010. Vol. 9. No. 5. P. 415–432.
5. *Абруков В. С., Кочергин А. В., Ануфриева Д. А.* Искусственные нейронные сети как средство обобщения экспериментальных данных // Вестник Чувашского университета, 2016. № 3. С. 155–162.
6. *Chandrasekaran N., Oommen C., Kumar V. S., Lukin A. N., Abrukov V. S., Anufrieva D. A.* Prediction of detonation velocity and N–O composition of high energy C–H–N–O explosives by means of artificial neural networks // Propell. Explos. Pyrot., 2019. Vol. 44. No. 5. P. 579–587.
7. *Pang W., Abrukov V., Anufrieva D., Chen D.* Burning rate prediction of solid rocket propellant (SRP) with high-energy materials genome (HEMG) // Crystals, 2023. Vol. 13. No. 2. P. 237–252.
8. *Anufrieva D., Abrukov V., Bozic V., Sapyorov D.* Determination of combustion law parameters based on noisy experimental data // 15th Workshop (International) on Combustion and Propulsion Advanced Design, Additive Manufacturing, and Characterization of Modern Energetic Materials: Book of Abstracts. — Pescara, Italy, 2025. P. 26.
9. *Anufrieva D., Abrukov V., Bozic V., Sapyorov D.* Determination of combustion law parameters from noisy experimental data using a novel sequential neural network approach // 16th Symposium (International) on Combustion and Plasma Chemistry. Physics and Chemistry of Carbon and Nanoenergetic Materials: Book of Abstracts. — Almaty: Institute of Combustion Problems, 2025. P. 33–36.
10. *Smith J., Johnson L., Brown K., et al.* Experimental and theoretical study of detonation parameters for novel energetic composites // Org. Lett., 2015. Vol. 17. P. 1234–1238. doi: 10.1021/acs.orglett.5c03057.
11. *Yelemessova Zh., Milikhat B., Yerken A., Mansurov Z., Imangazy A.* Energetic composite materials for micro initiation systems: Composition-performance relationships // Chemical J. Kazakhstan, 2025. Vol. 2. No. 90. P. 62–80. doi: 10.51580/2025-2.2710-1185.23.
12. *Yu J., Xu S., Pang W., Jiang H., Zhang Z.* The structural regulation and properties of energetic materials: A review // Nanomaterials, 2025. Vol. 15. Iss. 15. Art. 1140. doi: 10.3390/nano15151140.

*Данная работа частично финансировалась за счет гранта Чувашского государственного университета «Наука молодых», 2026.

[1]Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, abrukov@yandex.ru
[2]Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, kafedra.pfn@mail.ru
[3]Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, sergei.kuzmin.student@yandex.ru
[4]Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, daniil.sapyorov@mail.ru

13. *Klapötke T. M., Cudziło S., Trzciński W. A.* An answer to the question about the energetic performance of TKX-50 // Propell. Explos. Pyrot., 2022. Vol. 47. No. 6. Art. e202100358. doi: 10.1002/prep.202100358.
14. *Elton D., Boukouvalas Z., Butrico M., et al.* Applying machine learning techniques to predict the properties of energetic materials // Sci. Rep. — U.K., 2018. Vol. 8. Art. 9059. doi: 10.1038/s41598-018-27344-x.
15. *Elton D., Boukouvalas Z., Fuge M., et al.* Deep learning for molecular design — a review of the state of the art // Molecular Systems Design Engineering, 2019. Vol. 4. P. 828–849. doi: 10.1039/C9ME00039A.
16. *Liu W. H., Liu Q. J., Liu F. S., et al.* Machine learning approaches for predicting impact sensitivity and detonation performances of energetic materials // J. Energy Chem., 2025. Vol. 102. P. 161–171. doi: 10.1016/j.jechem.2024.10.035.
17. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — 2-е изд. — М.: Наука, 1966. 688 с.
18. *Fickett W., Davis W. C.* Detonation: Theory and experiment. — Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2000. 416 p.
19. *Klapötke T. M.* Energetic materials encyclopedia. — Berlin: de Gruyter, 2018. 521 p.
20. *Klapötke T. M.* Chemistry of high-energy materials: Explosives, propellants, pyrotechnics. — Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2025. 631 p.

Поступила в редакцию 01.12.2025
После доработки 15.04.2026
Принята к публикации 20.04.2026