

МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ГАЗОДИЗЕЛЕ*

С. М. Фролов¹, В. С. Иванов², И. В. Семенов³, В. А. Сметанюк⁴, Ф. С. Фролов⁵, И. О. Шамшин⁶

Аннотация: На основе детального кинетического механизма окисления (ДКМ) и горения индивидуальных углеводородных горючих разработаны глобальные кинетические механизмы (ГКМ) самовоспламенения и горения природного газа (ПГ) и дизельного топлива (ДТ) применительно к условиям рабочего процесса в газодизеле. На основе сопряженного алгоритма явного выделения фронта пламени и метода частиц в сочетании с этими ГКМ проведены расчеты рабочего процесса газодизеля с подачей основного заряда — обедненной горючим смеси ПГ с воздухом — и пилотным впрыском струи ДТ для зажигания основного заряда. Показана возможность применения нового алгоритма для разработки на его основе цифрового двойника газодизеля.

Ключевые слова: газодизель; рабочий процесс; природный газ; дизельное топливо; моделирование; цифровой двойник

DOI: 10.30826/CE26190106

EDN: OAGDKS

Литература

1. *Krishnamoorthi M., Malayalamurthi R., He Z., Kandasamy S.* A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2019. Vol. 116. P. 109404.
2. *Pham Q., Park S., Agarwal A.K., Park S.* Review of dual-fuel combustion in the compression-ignition engine: Spray, combustion, and emission // *Energy*, 2022. Vol. 250. P. 123778.
3. *Хачиян А. С., Шишлов И. Г., Карпов Д. М.* Сравнительный анализ циклов газового и газодизельного двигателей большой размерности // *Транспорт на альтернативном топливе*, 2013. № 2(32). С. 30–33.
4. *Yousefi A., Guo H., Birouk M.* Effect of diesel injection timing on the combustion of natural gas/diesel dual-fuel engine at low-high load and low-high speed conditions // *Fuel*, 2019. Vol. 235. P. 838–846. doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.064.
5. *Wei L., Geng P.* A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance // *Fuel Process. Technol.*, 2016. Vol. 142. P. 264–278. doi: 10.1016/j.fuproc.2015.09.018.
6. *Cao J., Liu Z., Shi H., Dong D., Kang S., Bu L.* A review of marine dual-fuel engine new combustion technology: Turbulent jet-controlled premixed-diffusion multi-mode combustion // *Energies*, 2025. Vol. 18. P. 3903. doi: 10.3390/en18153903.
7. *Kumar M. R., Mishra P.* Parametric investigation on combustion and emissions characteristics of a dual fuel (natural gas port injection and diesel pilot injection) engine using 0-D SRM and 3D CFD approach // *Fuel*, 2017. Vol. 210. P. 900–913.
8. *Zhang X., Gao J., Fan D., Yang Q., Han F., Yu H.* Impact of pilot diesel injection timing on performance and emission characteristics of marine natural gas/diesel dual-fuel engine // *Sci. Rep. — U.K.*, 2024. Vol. 14. P. 10713. doi: 10.1038/s41598-024-61672-5.
9. *Park H., Shim E., Lee J., et al.* Large-squish piston geometry and early pilot injection for high efficiency and low methane emission in natural gas-diesel dual fuel engine at high-load operations // *Fuel*, 2022. Vol. 308. P. 122015.
10. *Oh J., Oh S., Kim C., et al.* Effect of multi-angle diesel injector nozzle on emission and efficiency of natural gas/diesel dual-fuel combustion in compression ignition engine // *Fuel*, 2022. Vol. 316. P. 123442.
11. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М.* «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. 1. Основной химический процесс тепловыделения // *Хим. физика*, 1998. Т. 17. № 9. С. 112–128

* Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1). Авторы благодарны В. Я. Басевичу за помощь при разработке глобальных кинетических механизмов.

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова»; НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, smfrol@chph.ras.ru

² Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова», ivanov.vls@gmail.com

³ НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, ilyasemv@yandex.ru

⁴ Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова»; НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, smetanuk@chph.ras.ru

⁵ Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова»; НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, f.frolov@chph.ru

⁶ Федеральное исследовательское учреждение «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова»; НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, igor.shamshin@mail.ru

12. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C_1 – C_{10} к C_{11} – C_{16} // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 4. С. 87–96.
13. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе П. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. 478 с.
14. Pfahl U., Fieweger K., Adomeit G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon–air mixtures under engine conditions // P. Combust. Inst., 1996. Vol. 26. Iss. 1. P. 781–789.
15. Басевич В. Я., Беляев А. А., Медведев С. Н., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C_1 – C_7 к C_8H_{18} , C_9H_{20} и $C_{10}H_{22}$ // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 12. С. 9–25.
16. Басевич В. Я., Фролов С. М., Посвянский В. С., Веденев В. И., Романович Л. Б. Низкотемпературное самовоспламенение капли // Хим. физика, 2005. Т. 24. № 5. С. 89–98.
17. Басевич В. Я., Беляев А. А., Гоц А. Н., Посвянский В. С., Семенов И. В., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Расчетная программа для процесса самовоспламенения от сжатия в двигателе внутреннего сгорания // Горение и взрыв, 2012. Вып. 5. С. 167–172.
18. Иванов В. С., Фролов С. М. Математическое моделирование распространения пламени в гладких трубах и трубах с регулярными препятствиями // Пожаровзрывобезопасность, 2010. Т. 19. № 1. С. 14–19.
19. Иванов В. С., Фролов С. М. Математическое моделирование рабочего процесса и тяговых характеристик воздушно-реактивного импульсного детонационно-го двигателя в условиях сверхзвукового полета // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 48–61.
20. Фролов С. М. Ускорение перехода горения в детонацию: от К. И. Щелкина до наших дней // Физика горения и взрыва, 2012. Т. 48. № 3. С. 13–24.
21. Pope S. B. Turbulent flows. — Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 805 p.
22. AVL FIRE® — Computational Fluid Dynamics for Conventional and Alternative Powertrain Development. <https://www.avl.com/fire>.
23. Hanjalic K., Popovac M., Hadziabdic, M. A robust near-wall elliptic relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD // Int. J. Heat Fluid Fl., 2004. Vol. 25. P. 897–901.
24. Schiller L., Naumann Z. A drag coefficient correlation // Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1935. Vol. 77. P. 318–320.
25. Dukowicz J. K. A particle–fluid numerical model for liquid sprays // J. Comput. Phys., 1980. Vol. 35. P. 229–253.
26. Liu A. B., Reitz R. D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays. SAE Paper No. 930072. 1993.
27. Cohen S. D., Hindmarch A. C. CVODE user guide. — Lawrence Livermore National Laboratory, 1994. Report No. UCRL-MA-118618.
28. Przulj V., Basara B. Bounded convection schemes for unstructured grids. AIAA Paper No. 2001-2593, 2001.
29. Сергеев С. С., Фролов С. М., Басевич В. Я., Басара Б., Пришинг П. Моделирование процессов смесеобразования и сгорания в дизеле с применением детального кинетического механизма окисления горючего // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 2. С. 88–98.

Поступила в редакцию 30.10.2025

После доработки 15.01.2026

Принята к публикации 19.01.2026