

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРОБЛЕНИЯ, ИСПАРЕНИЯ И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАПЕЛЬ КЕРОСИНА В ВОЗДУХЕ*

К. А. Бырдин¹, В. А. Сметанюк², С. М. Фролов³, И. В. Семенов⁴

Аннотация: Проверены известные физико-математические модели дробления и испарения капель применительно к авиационному керосину и его однокомпонентным физическим суррогатам (*n*-декану и *n*-додекану), выбраны его однокомпонентный и 9-компонентный химические суррогаты, а также модифицированы известные глобальные кинетические механизмы самовоспламенения и горения паров этих суррогатов. Проверенные модели, выбранные суррогаты и модифицированные кинетические механизмы в совокупности использованы в многомерной задаче о самовоспламенении струи керосина в камере постоянного объема.

Ключевые слова: авиационный керосин; дробление капли; испарение капли; суррогатное топливо; самовоспламенение; горение; глобальный кинетический механизм; трехмерный газодинамический расчет

DOI: 10.30826/CE22150204

EDN: NRBRUP

Литература

1. Семенов Н. Н. Цепные реакции. — Л.: ОНТИ, 1934. 555 с.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. 367 с.
3. Варшавский Г. А. Горение капель жидкого топлива. — М.: Изд-во БНТ, 1945. 16 с.
4. Lorell J., Wise H., Carr R. E. Steady-state burning of a liquid droplet. II. Bipropellant flame // J. Chem. Phys., 1956. Vol. 25. No. 2. P. 325–331. doi: 10.1063/1.1742880.
5. Агафонова Ф. А., Гуревич М. А., Палеев И. И. К теории горения капли жидкого топлива // ЖТФ, 1957. Т. 27. № 8. С. 1818.
6. Варшавский Г. А., Федосеев Д. В., Франк-Каменецкий Д. А. Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива // Физика аэрозолей, 1966. № 1. С. 101–107.
7. Polymeropoulos C. E., Peskin R. L. Ignition and extinction of liquid fuel drops — numerical computations // Combust. Flame, 1969. Vol. 13. No. 2. P. 166–172. doi: 10.1016/0010-2180(69)90047-9.
8. Гуревич М. А., Сиркунен Г. И., Степанов А. М. О возможности использования квазистационарного приближения при расчете предела воспламенения капли // Физика аэродисперсных систем, 1972. № 6. С. 52.
9. Гольдшлегер Ю. И., Амосов С. Д. О механизме и закономерностях воспламенения и горения капель углеводородных топлив // Физика горения взрыва, 1977. Т. 13. № 6. С. 813–821.
10. Блошенко В. Н., Мержанов А. Г., Перегудов Н. И., Хайкин Б. И. К теории газофазного воспламенения капли // Мат-лы III Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка: ИХФ РАН, 1972. С. 227–233.
11. Godsave G. A. E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray — the burning of single drops of fuel // 4th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Baltimore, MD, USA, 1953. P. 818–830.
12. Spalding D. B. The burning of liquid fuels // 4th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Baltimore, MD, USA, 1953. P. 847–864.
13. Goldsmith M., Penner S. S. On the burning of single drops of fuel in an oxidizing atmosphere // Jet Propulsion, 1954. Vol. 24. No. 4. P. 245–251. doi: 10.2514/8.6508.
14. Sangiovanni J. J., MadKesten A. S. Effect of droplet interaction on ignition in monodispersed droplet streams // 16th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Pittsburgh, PA, USA: The Combustion Institute, 1977. No. 1. P. 577–592.
15. Rah S. C., Sarofim A. F., Beer J. M., et al. Ignition and combustion of liquid fuel droplets part II: Ignition studies // Combust. Sci. Technol., 1986. Vol. 49. No. 3-4. P. 169–184. doi: 10.1080/00102208608923909.

*Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2019-0006 (номер государственной регистрации АААА-А21-121011990037-8) и субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН в рамках государственного задания по теме № 0065-2019-0005 (рег. № АААА-А19-119011590092-6).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, byrdin.kirill@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, smetanuk@chph.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

⁴Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, ilyasemv@yandex.ru

16. Bergeron C. A., Hallett W. L. Ignition characteristics of liquid hydrocarbon fuels as single droplets // *Can. J. Chem. Eng.*, 1989. Vol. 67. No. 1. P. 142–149. doi: 10.1002/cjce.5450670120.
17. Cuoci A., Mehl M., Buzzi-Ferraris G., et al. Autoignition and burning rates of fuel droplets under microgravity // *Combust. Flame*, 2005. Vol. 143. No. 3. P. 211–226. doi: 10.1016/j.combustflame.2005.06.003
18. 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. 71–80.
19. Фролов С. М., Басевич В. Я. Законы горения / Под ред. Ю. В. Полежаева. — М.: Энергомаш, 2006. 130 с.
20. Massoli P., Lazzaro M., Beretta F., D'Alessio A. Report on research activities and facilities / Ed. A. Di Lorenzo. — Napoli: Instituto Motori C.NR., 1993. P. 36.
21. Takei M., Kobayashi H., Niioka T. Ignition experiment of a blended-fuel droplet in a microgravity field // *Microgravity Sci. Tec.*, 1993. Vol. 6. No. 3. P. 184–187.
22. Niioka T., Kobayashi H., Mito D. Ignition experiment on droplet array in normal and microgravity environments // *IVTAM Symposium on the Mechanics and Combustion of Droplet and Sprays Proceedings*. — Tainan, 1994. P. 367.
23. Atthasit A., Doue N., Biscos Y., et al. Influence of drop concentration on the dynamics and evaporation of a monodisperse stream of drops in evaporation regime // *Combustion and atmospheric pollution* / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, A. M. Starik. — Moscow: TORUS PRESS, 2003. P. 214–219.
24. Соколик А. С., Басевич В. Я. Задержки самовоспламенения моторных топлив // *Ж. физ. химии*, 1954. Т. 28. № 11. С. 19–35.
25. Tanner F. X. A cascade atomization and drop breakup model for the simulation of high-pressure liquid jets. SAE Paper No. 2003-01-1044, 2003. 15 p.
26. Twardus E. M., Brzustowski T. A. Interaction between two burning fuel droplets // *Arch. Termodyn. Spalania*, 1977. Vol. 8. P. 347–358.
27. Dwyer H. A., Nirschl H., Kerschl P., Denk V. Heat, mass, and momentum transfer about arbitrary groups of particles // *Symposium (International) on Combustion*, 1994. Vol. 25. No. 1. P. 389–395.
28. Marberry M., Ray A. K., Leung K. Effect of multiple particle interactions on burning droplets // *Combust. Flame*, 1984. Vol. 57. No. 3. P. 237–245. doi: 10.1016/0010-2180(84)90043-9.
29. Sivasankaran K., Seetharamu K. N., Natarajan R. Numerical investigation of the interference effects between two burning fuel spheres // *Int. J. Heat Mass Tran.*, 1996. Vol. 39. No. 18. P. 3949–3957. doi: 10.1016/0017-9310(95)00407-6.
30. Chiu H. H., Liu T. M. Group combustion of liquid droplets // *Combust. Sci. Technol.*, 1977. Vol. 17. No. 3-4. P. 127–142. doi: 10.1080/00102207708946823.
31. Correa S. M., Sichel M. The group combustion of a spherical cloud of monodisperse fuel droplets // *Symposium (International) on Combustion*, 1982. Vol. 19. No. 1. P. 981–991. doi: 10.1016/s0082-0784(82)80274-9.
32. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
33. Kent J. C. Quasi-steady diffusion-controlled droplet evaporation and condensation // *Appl. Sci. Res.*, 1973. Vol. 28. No. 1. P. 315–360. doi: 10.1007/BF00413076.
34. Law C. K. Recent advances in droplet vaporization and combustion // *Progress Energy Combust. Sci.*, 1982. Vol. 8. No. 3. P. 171–201. doi: 10.1016/0360-1285(82)90011-9.
35. Sirignano W. A. Fuel droplet vaporization and spray combustion theory // *Prog. Energ. Combust.*, 1983. Vol. 9. No. 4. P. 291–322. doi: 10.1016/0360-1285(83)90011-4.
36. Bachalo W. D. Injection, dispersion, and combustion of liquid fuels // *Symposium (International) on Combustion*, 1994. Vol. 25. No. 1. P. 333–334.
37. Avedisian C. T. Recent advances in soot formation from spherical droplet flames at atmospheric pressure // *J. Propul. Power*, 2000. Vol. 16. No. 4. P. 628–635. doi: 10.2514/2.5619.
38. Mashayek F., Pandya R. V. R. Analytical description of particle/droplet-laden turbulent flows // *Prog. Energ. Combust.*, 2003. Vol. 29. No. 4. P. 329–378. doi: 10.1016/S0360-1285(03)00029-7.
39. Варнац Ю., Маас У., Диббл Р. Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. — М.: Физматлит, 2003. 352 с. (Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. *Combustion: Physical & chemical fundamentals, modelling & simulation, experiments, pollutant formation*. — Springer, 1966. 265 p.)
40. Reitz R. D. Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays // *Atomisation Spray Technology*, 1987. Vol. 3. No. 4. P. 309–337.
41. Liu A. B., Mather D., Reitz R. D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays. SAE Paper No. 930072, 1993. 13 p.
42. Gonzalez M., Lian Z., Reitz R. D. modeling diesel engine spray vaporization and combustion. SAE Paper 920579, 1992.
43. Chung J. H., Wakisaka T., Ibaraki K. An improved droplet breakup model for three-dimensional diesel spray simulation // *KSME/JSME Thermal and Fluid Engineering Conference Proceedings*, 1996. P. 167–172.
44. Wakisaka T., Kato N., Nguyen T. T., et al. Numerical prediction of mixture formation and combustion processes in premixed compression ignition engines // *5th Symposium (International) on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines Proceedings*. — Nagoya, Japan, 2001. P. 426–433.
45. Cameretti M. C., Tuccillo R. Flow and atomization models for CR diesel engine CFD simulation // *ASME/IEEE Joint Rail Conference Proceedings*, 2007. P. 451–461. doi: 10.1115/JRC/ICE2007-40068.
46. O'Rourke P. J., Amsden A. A. The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup. SAE Paper No. 872089, 1987.
47. Eckhause J. E., Reitz R. D. Modeling heat transfer to impinging fuel sprays in direct-injection engines // *Atomiza-*

- tion Spray, 1995. Vol. 5. No. 2. P. 213–242. doi: 10.1615/AtomizSpr.v5.i2.60.
48. *Chen P. C., Wang W. C., Roberts W. L., Fang T.* Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system // *Fuel*, 2013. Vol. 103. P. 850–861. doi: 10.1016/j.fuel.2012.08.013.
 49. *Колчин А. И., Демидов В. П.* Расчет автомобильных и тракторных двигателей. — М.: Высшая школа, 1980. 400 с.
 50. *Dernotte J., Hespel C., Foucher F., Houille S., Mounaïm-Rousselle C.* Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector // *Fuel*, 2012. Vol. 96. P. 153–160. doi: 10.1016/j.fuel.2011.11.073.
 51. AVL FIRE® — Computational Fluid dynamics for conventional and alternative powertrain development. <https://www.avl.com/fire>.
 52. *Rachner M., Becker J., Hassa Ch., Doerr T.* Modelling of the atomization of a plain liquid fuel jet in crossflow at gas turbine conditions // *Aerosp. Sci. Technol.*, 2002. Vol. 6. No. 7. P. 495–506. doi: 10.1016/S1270-9638(01)01135-X.
 53. *Edwards T., Maurice L. Q.* Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels // *J. Propul. Power*, 2001. Vol. 17. No. 2. P. 461–466. doi:10.2514/2.5765.
 54. *Frolov S. M., Frolov F. S., Basara B.* Simple model of transient drop vaporization // *J. Russ. Laser Res.*, 2006. Vol. 27. No. 6. P. 562–574. doi: 10.1007/s10946-006-0035-7.
 55. *Dukowicz J. K.* Quasi-steady droplet phase change in the presence of convection. — Los Alamos, NM, USA: Los Alamos Scientific Lab., 1979. Report No. LA-7997-MS.
 56. *Murakami Y., Nomura H., Suganuma Y.* Experimental study on unsteadiness of *n*-decane single droplet evaporation and effect of natural convection on droplet evaporation at high pressures and temperatures // *T. Jpn. Soc. Aeronaut. S.*, 2021. Vol. 19. No. 5. P. 647–653. doi: 10.2322/tastj.19.647.
 57. *Фролов С. М., Кузнецов Н. М., Крюгер С.* Свойства реальных газов — *n*-алканов, O₂, N₂, H₂O, CO, CO₂ и H₂ в условиях эксплуатации дизельного двигателя // *Сверхкритические флюиды: Теория и практика*, 2009. Т. 4. № 3. С. 56–105.
 58. *Qin W., Lu D., Xu L.* Spray combustion characteristics of single/multicomponent surrogate fuel for aviation kerosene // *J. Eng. Gas Turb. Power*, 2022. Vol. 144. No. 3. P. 031024. doi: 10.1115/1.4052782.
 59. *Westbrook C. K., Sarofim A., Eddings E.* C-SAFE validation project. — Salt Lake City, UT, USA: Department of Chemical and Fuels Engineering, University of Utah, 2002. 86 p.
 60. *Dean A. J., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Varatharajan B.* Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. No. 2. P. 2481–2488. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.162.
 61. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Медведев С. Н., Посвянский В. С., Фролов С. М.* Кинетические детальные и глобальные механизмы для суррогатного топлива // *Горение и взрыв*, 2015. Т. 8. № 1. С. 21–28.
 62. *Honnet S., Seshadri K., Niemann U., Peters N.* A surrogate fuel for kerosene // *P. Combust. Inst.*, 2009 Vol. 32. No. 1. P. 485–492. doi: 10.1016/j.proci.2008.06.218.
 63. *Liu Y., Liu Y., Chen D., Fang W., Li J., Yan Y.* A simplified mechanistic model of three-component surrogate fuels for RP-3 aviation kerosene // *Energ. Fuel*, 2018. Vol. 32. No. 9. P. 9949–9960. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b02094.
 64. *Allen C., Toulson E., Edwards T., Lee T.* Application of a novel charge preparation approach to testing the autoignition characteristics of JP-8 // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. No. 9. P. 2780–2788. doi: 10.1016/j.combustflame.2012.03.019.
 65. *Vasu S. S., Davidson D. F., Hanson R. K.* Jet fuel ignition delay times: Shock tube experiments over wide conditions and surrogate model predictions // *Combust. Flame*, 2008. Vol. 152. No. 1–2. P. 125–143. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.06.019.
 66. *Gauthier B. M., Davidson D. F., Hanson R. K.* Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures // *Combust. Flame*, 2004. Vol. 139. No. 4. P. 300–311. doi: 10.1016/j.combustflame.2004.08.015.
 67. *Ji C., You X., Holley A. T., Wang Y. L., et al.* Propagation and extinction of mixtures of air with *n*-dodecane, JP-7, and JP-8 jet fuels. AIAA Paper No. 2008-974, 2008.
 68. *Kumar K., Sung C. J., Hui X.* Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels. AIAA Paper No. 2009-991, 2009.
 69. *Singh D., Nishiie T., Qiao L.* Laminar burning speeds and Markstein lengths of *n*-decane/air, *n*-decane/O₂/He, Jet-A/air and S-8/air flames. AIAA Paper No. 2010-951, 2010.
 70. *Meeks E., Naik C. V., Puduppakkam K. V., et al.* Experimental and modeling studies of the combustion characteristics of conventional and alternative jet fuels. — Cleveland, OH, USA: Glenn Research Center, 2011. Final Report NASA/CR-2011-216356. 76 p.
 71. *Dooley S., Won S. H., Heyne J., et al.* The experimental evaluation of a methodology for surrogate fuel formulation to emulate gas phase combustion kinetic phenomena // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. No. 4. P. 1444–1466. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.11.002.
 72. *Munzar J. D.* laminar flame speed of jet fuel surrogates and second generation biojet fuel blends. — Montreal, Quebec: McGill University, 2013. Master Thesis. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/w9505389x>.
 73. *Zhang J., Jing W., Fang T.* High speed imaging of OH* chemiluminescence and natural luminosity of low temperature diesel spray combustion // *Fuel*, 2012. Vol. 99. P. 226–234. doi: 10.1016/j.fuel.2012.04.031.
 74. *Jing W., Roberts W. L., Fang T.* Spray combustion of Jet-A and diesel fuels in a constant volume combustion chamber // *Energ. Convers. Manage.*, 2015. Vol. 89. P. 525–540. doi: 10.1016/j.enconman.2014.10.010.

Поступила в редакцию 15.04.2022