

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА, ТУРБУЛЕНТНОСТИ И КИНЕТИКИ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС В МОДЕЛЬНОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С УСТУПОМ

В. В. Власенко¹, О. В. Волощенко², С. М. Фролов³, А. Э. Зангиев⁴, И. В. Семенов⁵, Ф. С. Фролов⁶

Аннотация: Представлены новые результаты численного моделирования течения с горением углеводородного топлива в модельной высокоскоростной камере сгорания (КС) с прямоугольным уступом. Описаны двумерные расчеты в разных постановках: с моделированием нестационарного теплообмена поперек стенок камеры; с заданной температурой стенок; с различными моделями турбулентности; в квазиламинарном приближении и с учетом влияния турбулентности на средние скорости реакций; с использованием различных моделей химической кинетики. Получены как колебательные режимы горения, так и стационарные. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментом.

Ключевые слова: высокоскоростная камера сгорания; углеводородное топливо; колебания пламени; дефлаграция; теплообмен; турбулентное горение; химическая кинетика

DOI: 10.30826/CE18110206

Литература

1. Власенко В. В., Волощенко О. В., Иванькин М. А., Николаев А. А., Чевагин А. Ф., Ширяева А. А., Семенов И. В., Фролов С. М., Зангиев А. Э., Фролов Ф. С. Исследование высокоскоростных течений в модельных камерах сгорания // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения / Под ред. С. Л. Чернышева. — М.: Наука, 2016. С. 215–227.
2. Фролов С. М., Зангиев А. Э., Семенов И. В., Власенко В. В., Волощенко О. В., Николаев А. А., Ширяева А. А. Моделирование течения в высокоскоростной камере сгорания в трехмерной и двумерной постановке // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 1. С. 126–135.
3. Vlasenko V. V., Shiryayeva A. A. 2.5D approximation for numerical simulation of flows in engine ducts // 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, 2015. 13 p.
4. Власенко В. В., Ширяева А. А. 2015. Расчеты течения в модельной высокоскоростной камере сгорания с использованием различных моделей химической кинетики // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 1. С. 116–125.
5. Власенко В. В., Волощенко О. В., Николаев А. А. Развитие течения в высокоскоростной камере сгорания при разных значениях коэффициента избытка воздуха // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 3. С. 47–56.
6. Гуськов О. В. Разработка метода расчета и исследование газодинамической структуры потока в канале при горении водорода при сверхзвуковых условиях на входе: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — М.: ЦИАМ, 2003. РГБ ОД, 61:04-1/276. 134 с.
7. Власенко В. В. Численное исследование нестационарного распространения горения по каналу со сверхзвуковым течением вязкого газа // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 9. С. 42–54.
8. Бабулин А. А., Босняков С. М., Власенко В. В., Енгулатова М. Ф., Матяш С. В., Михайлов С. В. Опыт валидации и настройки моделей турбулентности применительно к задаче об отрыве пограничного слоя на клине конечной ширины // Ж. вычисл. мат. мат. физ., 2016. Т. 56. № 6. С. 1034–1048.
9. Vlasenko V. V., Shiryayeva A. A. Numerical simulation of non stationary propagation of combustion along a duct with supersonic flow of a viscid gas // P. I. Mech. Eng. G, 2012. Vol. 227. No. 3. P. 480–492.
10. Власенко В. В., Матяш С. В., Михайлов С. В. Новые модификации модели турбулентности Спаларта–Альмараса // Мат-лы XXVIII науч.-технич. конф. по аэродинамике. — ЦАГИ, 2017. С. 70–71.
11. Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Семенов И. В., Власенко В. В. Влияние турбулентности на развитие течения в высокоскоростной камере сгорания // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 3. С. 66–79.
12. Басевич В. Я., Фролов С. М. Глобальные кинетические механизмы, использующиеся при моделирова-

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), vlasenko.vv@yandex.ru

²Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), chevagin@tsagi.ru

³Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

⁴Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

⁵Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, semenov@icad.org.ru

⁶Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

нии многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // Хим. физика, 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.

13. *Власенко В. В.* О различных способах определения теплового эффекта и полноты сгорания в потоке ре-

агирующего газа // Ученые записки ЦАГИ, 2014. Т. XLV. № 1. С. 1–25.

14. *Щетинков Е. С.* Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. 740 с.

Поступила в редакцию 22.05.18

INFLUENCE OF HEAT TRANSFER, TURBULENCE, AND KINETICS ON A FLOW IN MODEL HIGH-SPEED COMBUSTION CHAMBER WITH STEP

V. V. Vlasenko¹, O. V. Voloshchenko¹, S. M. Frolov², A. E. Zangiev², I. V. Semenov³, and F. S. Frolov²

¹Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovsky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation

²N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

³Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation

Abstract: New results of numerical simulation of flow with combustion of hydrocarbon fuel in a model high-speed combustion chamber with a step are presented. Two-dimensional calculations in different formulations are described: with modeling of nonstationary heat transfer across the chamber walls; with a given wall temperature; with different models of turbulence; in the quasi-laminar approximation and with taking into account the turbulence–combustion interaction; and with the use of different models of chemical kinetics. Both oscillatory combustion regimes and the stationary ones are obtained. The results of the calculations are compared with the experiment.

Keywords: high-speed combustor; hydrocarbon fuel; flame oscillations; deflagration; heat exchange; turbulent combustion; chemical kinetics

DOI: 10.30826/CE18110206

References

1. Vlasenko, V. V., O. V. Voloshchenko, M. A. Ivankin, A. A. Nikolaev, A. F. Chevagin, A. A. Shiryaeva, I. V. Semenov, S. M. Frolov, A. E. Zangiev, and F. S. Frolov. 2016. Issledovaniya vysokoskorostnykh techeniy v model'nykh kamerakh sgoraniya [Studies of high-speed flows in model combustors]. *Rezultaty fundamental'nykh issledovaniy v prikladnykh zadachakh aviastroeniya* [Results of fundamental studies in applied tasks of aircraft building]. Ed. S. L. Chernyshev. Moscow: Nauka. 215–227.
2. Frolov, S. M., A. E. Zangiev, I. V. Semenov, V. V. Vlasenko, O. V. Voloshchenko, A. A. Nikolaev, and A. A. Shiryaeva. 2015. Modelirovanie techeniya v vysokoskorostnoy kamere sgoraniya v trekhmernoy i dvumernoy postanovke [Simulation of flow in a high-speed combustor in 3D and 2D formulation]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(1):126–135.
3. Vlasenko, V. V., and A. A. Shiryaeva. 2015. 2.5D approximation for numerical simulation of flows in engine ducts. *6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*. 13 p.
4. Vlasenko, V. V., and A. A. Shiryaeva. 2015. Raschety techeniya v model'noy vysokoskorostnoy kamere sgoraniya s ispol'zovaniem razlichnykh modeley khimicheskoy kinetiki [Computations of flow in a model high-speed combustor using different kinetic schemes]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(1):116–125.
5. Vlasenko, V. V., O. V. Voloshchenko, and A. A. Nikolaev. 2016. Razvitie techeniya v vysokoskorostnoy kamere sgoraniya pri raznykh znacheniyakh koeffitsienta izbytkha vozdukha [Flow development in a high-speed combustor at various values of air excess ratio]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(3):47–56.
6. Guskov, O. V. 2003. Razrabotka metoda rascheta i issledovanie gazodinamicheskoy struktury potoka v kanale pri gorenii vodoroda pri sverkhzvukovykh usloviyakh na vkhode [Development of calculation method and study of gasdynamic structure of flow in a duct with hydrogen combustion at supersonic conditions at the entrance]. PhD Diss. Moscow: CIAM. Russian State Library OD, 61:04-1/276. 134 p.
7. Vlasenko, V. V. 2011. Numerical simulation of the unsteady propagation of combustion in a duct with a supersonic viscous gas flow. *Russ. J. Phys. Chem. B* 5(5):800–812.
8. Babulin, A. A., S. M. Bosnyakov, V. V. Vlasenko, M. F. Engulatova, S. V. Matyash, and S. V. Mikhailov. 2016. Experience of validation and tuning of turbulence models as applied to the problem of boundary layer separation on a finite-width wedge. *Comp. Math. Math. Phys.* 56(6):1020–1033.
9. Vlasenko, V. V., and A. A. Shiryaeva. 2012. Numerical simulation of non-stationary propagation of combustion along a duct with supersonic flow of a viscous gas. *P. I. Mech. Eng. G* 227(3):480–492.

10. Vlasenko, V. V., S. V. Matyash, and S. V. Mikhailov. 2017. Novye modifikatsii modeli turbulentnosti Spalarta—Al'marasa [New modifications of Spalart—Allmaras turbulence model]. *Mat-ly XXVIII nauchn.-tekhnich. konf. po aerodinamike* [28th Scientific-Technical Conference in Aerodynamics Proceedings]. TsAGI. 70–71.
11. Zangiev, A. E., V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, S. M. Frolov, F. S. Frolov, I. V. Semenov, and V. V. Vlasenko. 2016. Vliyaniye turbulentnosti na razvitiye techeniya v vysokoskorostnoy kamere sgoraniya [Influence of turbulence on development of flow in high-speed combustion chamber]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(3):66–79.
12. Basevich, V. Ya., and S. M. Frolov. 2006. Global'nye kineticheskie mekhanizmy, ispol'zuyushchiesya pri modelirovaniy mnogostadiynogo samovosplamneniya uglevodorodov v reagiruyushchikh techeniyakh [Global kinetic mechanisms for simulation of multistage self-ignition of hydrocarbons in reactive flows]. *Khim. Fiz.* 25(6):54–62.
13. Vlasenko, V. V. 2014. About different ways to determine the heat effect and the combustion efficiency in a flow of reactive gas. *TsAGI Science J.* 45(1):35–59.
14. Shchetnikov, E. S. 1965. *Fizika goreniya gazov* [Physics of gas combustion]. Moscow: Nauka. 740 p.

Received May 22, 2018

Contributors

Vlasenko Vladimir V. (b. 1969) — Candidate of Science in physics and mathematics, head of sector, Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovsky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; vlasenko.vv@yandex.ru

Voloshchenko Oleg V. (b. 1934) — leading engineer, Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovsky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; chevagin@tsagi.ru

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Zangiev Alan E. (b. 1989) — research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; sydra777@gmail.com

Semenov Ilya V. (b. 1973) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; semenov@icad.org.ru

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru