

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СМЕШЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ БАРОУСА–КУРКОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SA-RANS МОДЕЛИ\*

Р. С. Соломатин<sup>1</sup>, И. В. Семенов<sup>2</sup>

**Аннотация:** Рассматривается численная модель смешения параллельных турбулентных пространственных течений при сверхзвуковых скоростях. Используется RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) подход на основе модели турбулентности Спаларта–Аллмараса (SA — Spalart–Allmaras), дополненный моделью смешения с учетом турбулентной диффузии. Система осредненных уравнений Навье–Стокса, замкнутая уравнением модели турбулентности, решается с помощью метода LU–SGS–GMRES (lower-upper symmetric Gauss–Seidel generalized minimal residual). Для валидации численных алгоритмов SA модели турбулентности и турбулентной диффузии в многокомпонентном газе проведено моделирование задачи о впрыске водорода в поток инертного газа, двигающийся со скоростью, соответствующей  $M = 2,44$  и их дальнейшем смешении в модельной камере сгорания Барроуса–Куркова. Задача решена в двумерной (2D) и трехмерной (3D) постановках. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными и расчетными данными. Расчеты выполнены с использованием многопроцессорной вычислительной системы «МВС-10П» МСЦ РАН.

**Ключевые слова:** сверхзвуковые течения; смешение; модель турбулентности Спаларта–Аллмараса; камера сгорания Барроуса–Куркова; LU–SGS–GMRES алгоритм

**DOI:** 10.30826/CE19120308

### Литература

1. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Medvedev S. N., Shamshin I. O. Flow structure in rotating detonation engine with separate supply of fuel and oxidizer: Experiment and CFD // Detonation control for propulsion: Pulse detonation and rotating detonation engines / Eds. J.-M. Li, C. J. Teo Boo Cheong Khoo, J.-P. Wang, C. Wang. — Springer International Publishing AG, 2018. P. 39–59.
2. Сметанюк В. А., Фролов С. М., Иванов В. С., Басара Б. Влияние способа подачи топливных компонентов на характеристики детонационного ракетного двигателя // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 2. С. 74–84.
3. Соломатин Р. С., Семенов И. В., Меньшов И. С. К расчету турбулентных течений на основе модели Спаларта–Аллмараса с применением LU–SGS–GMRES алгоритма // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018. № 119. 30 с. doi: 10.20948/prepr-2018-119.
4. Burrows M. C., Kurkov A. P. Analytical and experimental study of supersonic combustion of hydrogen in a vitiated airstream. NASA-TM-X-2828.
5. Edwards J. R., Boles J. A., Baurle R. A. Large-eddy / Reynolds-averaged Navier–Stokes simulation of a supersonic reacting wall jet // Combust. Flame, 2012. Vol. 159. P. 1127–1138.
6. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. AIAA Paper No. 1992-0439, 1992. 22 p.
7. Turbulence Modelling Resource of Langley Research Center. <https://turbmodels.larc.nasa.gov>.
8. Burcat A., Ruscic B. Third Millennium Ideal Gas and Condensed Phase Thermochemical Database for Combustion with updates from Active Thermochemical Tables. ANL-05/20 and TAE 960 Technion–IIT. Aerospace Engineering and Argonne National Laboratory, Chemistry Division, 2005.
9. Menshov I. S., Nakamura Y. Hybrid explicit-implicit, unconditionally stable scheme for unsteady compressible flows // AIAA J., 2004. Vol. 42. No. 3. P. 551–559.
10. Luo H., Baum J. D., Lohner R. An accurate, fast, matrix-free implicit method for computing unsteady flows on unstructured grids // Comput. Fluids, 2001. Vol. 30. P. 137–159.
11. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. 400 с.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № 0065-2019-0005 «Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем» (№ АААА-А19-119011590092-6).

<sup>1</sup> Институт автоматизации проектирования РАН; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, roman.solomatin.94@gmail.com

<sup>2</sup> Институт автоматизации проектирования РАН; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, semenov@icad.org.ru

12. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. V — A second-order sequel to Godunov's method // *J. Comput. Phys.*, 1979. Vol. 32. P. 101–136. doi: 10.1016/0021-9991(79)90145-1.
13. *Gao Z., Jiang Ch., Lee Ch.-H.* On the laminar finite rate model and flamelet model for supersonic turbulent combustion flows // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2016. Vol. 41. P. 13238–13253.

*Поступила в редакцию 27.08.19*