

## ПОИСК ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ВАЛИДАЦИОННЫХ РАСЧЕТАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ONERA LAPCAT II С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ СТЕНОК КАНАЛА\*

В. А. Сабельников<sup>1</sup>, А. И. Трошин<sup>2</sup>, С. Бахнэ<sup>3</sup>, С. С. Молев<sup>4</sup>, В. В. Власенко<sup>5</sup>

**Аннотация:** Описаны результаты второго этапа численного моделирования эксперимента ONERA LAPCAT II по высокоскоростному горению водорода в модельном канале. На данном этапе расчеты проводились с учетом шероховатости стенок канала. Представлены результаты расчетов на базе подхода IDDES-SST. Показано, что влияние шероховатости стенок существенно, но не позволяет достичь хорошего согласования с экспериментальными данными. Поиск определяющих физических факторов проводился на базе RANS-расчетов (RANS — Reynolds-averaged Navier–Stokes). Проверено влияние химической кинетики, переменного турбулентного числа Прандтля и высоты шероховатости. Наибольшее влияние на распределение давления по стенкам канала кроме шероховатости оказывает температура стенок канала. Найдена температура стенок, обеспечивающая хорошее согласование с экспериментом ONERA.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое горение; шероховатость; теплообмен; численное моделирование; экспериментальная валидация

**DOI:** 10.30826/CE21140406

### Литература

1. Лаборатория JetSim. <http://tsagi.ru/institute/lab220/>.
2. Власенко В. В., Михайлов С. В., Молев С. С., Трошин А. И., Ширяева А. А. Программа для численного моделирования трехмерных течений с горением в каналах прямооточных воздушно-реактивных двигателей в рамках подходов URANS и DES с применением моделей взаимодействия турбулентности с горением, технологии дробного шага по времени и метода пристеночных функций (zFlare). Свидетельство № 2019610822 от 18 января 2019 г. о государственной регистрации программы для ЭВМ.
3. Власенко В. В., Ноздрачев А. Ю., Сабельников В. А., Ширяева А. А. Анализ механизмов стабилизации турбулентного горения по данным расчетов с применением модели реактора частичного перемешивания // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 42–56.
4. Troshin A., Shiryayeva A., Vlasenko V., Sabelnikov V. Large-eddy simulation of helium and argon supersonic jets in supersonic air co-flow // Springer Proc. Phys., 2018. Vol. 226. P. 253–258.
5. Troshin A., Vlasenko V., Sabelnikov V. Large eddy simulation of a transverse hydrogen jet in supersonic crossflow // 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences Proceedings. — EUCASS Association, 2019. doi: 10.13009/EUCASS2019-625.
6. Vincent-Randonnier A., Moule Y., Ferrier M. Combustion of hydrogen in hot air flows within LAPCAT-II Dual Mode Ramjet combustor at Onera-LAERTE facility — experimental and numerical investigation. AIAA Paper No. 2014-2932, 2014. 16 p.
7. Vincent-Randonnier A., Sabelnikov V., Ristori A., Zettervall N., Fureby C. An experimental and computational study of hydrogen–air combustion in the LAPCAT II supersonic combustor // P. Combust. Inst., 2019. Vol. 37. No. 3. P. 3703–3711.

\*Описанные в статье численные исследования поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации (договор № 14.G39.31.0001 от 13 февраля 2017 г.). Огромная благодарность Акселю Венсану-Рандоннье и Гийому Пеллетье (ONERA) за многократное обсуждение результатов экспериментов и расчетов, а также за предоставление дополнительной информации по условиям экспериментов и постановке расчетов.

<sup>1</sup>Французская аэрокосмическая лаборатория (ONERA); Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), [sabelnikov@free.fr](mailto:sabelnikov@free.fr)

<sup>2</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), [ai-troshin@yandex.ru](mailto:ai-troshin@yandex.ru)

<sup>3</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), [serega733377@yandex.ru](mailto:serega733377@yandex.ru)

<sup>4</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), [molev@phystech.edu](mailto:molev@phystech.edu)

<sup>5</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), [vlasenko.vv@yandex.ru](mailto:vlasenko.vv@yandex.ru)

8. Balland S., Vincent-Randonnier A. Numerical study of hydrogen/air combustion with CEDRE code on LAERTE dual mode ramjet combustion experiment. AIAA Paper No. 2015-3629, 2015. 10 p.
9. Pelletier G., Ferrier M., Vincent-Randonnier A., Sabelnikov V., Mura A. Wall roughness effects on combustion development in confined supersonic flow // J. Propul. Power, 2021. Vol. 37. No. 1. P. 151–166.
10. Pelletier G., Ferrier M., Vincent-Randonnier A., Mura A. Delayed detached eddy simulations of rough-wall turbulent reactive flows in a supersonic combustor. AIAA Paper No. 2020-2409, 2020. doi: 10.2514/6.2020-2409. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03224513/document>.
11. Власенко В. В., Лю В., Молев С. С., Сабельников В. А. Влияние условий теплообмена и химической кинетики на структуру течения в модельной камере сгорания ONERA LAPCAT II // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 2. С. 36–47.
12. Suga K., Craft T. J., Iacovides H. An analytical wall-function for turbulent flows and heat transfer over rough walls // Int. J. Heat Fluid Fl., 2006. Vol. 27. No. 5. P. 852–866.
13. Gritskevich M. S., Garbaruk A. V., Schütze J., Menter F. R. Development of DDES and IDDES formulations for the  $k$ - $\omega$  shear stress transport model // Flow Turbul. Combust., 2011. Vol. 88. No. 3. P. 431–449.
14. Aupoix B. 2015. Roughness corrections for the  $k$ - $\omega$  SST model: Status and proposals // J. Fluid. Eng. — Т. ASME, 2015. Vol. 137. P. 021202-1. doi: 10.1115/1.4028122.
15. Aupoix B. Improved heat transfer predictions on rough surfaces // Int. J. Heat Fluid Fl., 2015. No. 56. P. 160–171.
16. Bosnyakov S., Kursakov I., Lysenkov A., Matyash S., Mikhailov S., Vlasenko V., Quest J. Computational tools for supporting the testing of civil aircraft configurations in wind tunnels // Prog. Aerosp. Sci., 2008. Vol. 44. No. 2. P. 67–120.
17. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K., Travin A. K. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows // Flow Turbul. Combust., 2015. Vol. 95. No. 4. P. 709–737.
18. Jachimowski C. J. An analytical study of the hydrogen–air reaction mechanism with application to scramjet combustion. NASA TP-2791, 1988. 16 p.
19. Zhang R., Zhang M., Shu C. W. On the order of accuracy and numerical performance of two classes of finite volume WENO schemes // Commun. Comput. Phys., 2011. Vol. 9. No. 3. P. 807–827.
20. Suresh A., Huynh H. Accurate monotonicity-preserving schemes with Runge–Kutta time stepping // J. Comput. Phys., 1997. Vol. 136. No. 1. P. 83–99.
21. Гусева Е. К. Анализ и оценка эффективности методов, обеспечивающих ускорение перехода к численно разрешаемой турбулентности при использовании незонных гибридных подходов к расчету турбулентных течений: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — СПб.: СПбГПУ Петра Великого, 2017.
22. Шагалиев Р. М., Корзаков Ю. Н., Логвин Ю. В., Петрик А. Н., Рыбкин А. С., Семенов Г. П., Шатохин А. В., Черных С. О., Южаков В. В. СуперЭВМ разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» для гражданских отраслей России // Вестник кибернетики, 2015. № 4. С. 12–29.
23. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence Heat Mass Transfer, 2003. Vol. 4. No. 1. P. 625–632.
24. Сабельников В. А., Власенко В. В., Молев С. С., Трошин А. И., Бахнэ С. Объяснение роста скорости самоподдерживающейся детонации при ее распространении вверх по потоку в канале с пограничными слоями // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 4. С. 62–74.

Поступила в редакцию 15.11.2021