

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ РАСЧЕТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ*

В. В. Власенко¹, А. Ю. Ноздрачев², В. А. Сабельников³, А. А. Ширяева⁴

Аннотация: Представлены два примера применения моделей реактора частичного перемешивания (PaSR — Partially Stirred Reactor) к описанию течений с турбулентным горением — моделирование эксперимента Cheng *et al.* по горению сверхзвуковой струи водорода в спутном сверхзвуковом потоке воздуха и эксперимента Magre *et al.* по горению предварительно перемешанной смеси метана с воздухом в дозвуковом течении в канале с обратным уступом. Результаты моделирования сравниваются с экспериментом и расчетами других авторов. Основное внимание уделяется анализу механизмов стабилизации горения на основе результатов расчетов.

Ключевые слова: турбулентное горение; взаимодействие турбулентности и горения; реактор частичного перемешивания, механизм стабилизации горения; валидация расчетов

DOI: 10.30826/CE19120106

Литература

1. Damköhler G. Der Einfluß der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen // Zeitschrift für Elektrochemie, 1940. Vol. 46. P. 601–652.
2. Щетников Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. 740 с.
3. Kuznetsov V. R., Sabelnikov V. A. Turbulence and combustion. — New York, NY, USA: Hemisphere, 1990. 362 p.
4. Peters N. Turbulent combustion. — Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. 304 p.
5. Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion. — 2nd ed. — Philadelphia, PA, USA: R. T. Edwards, Inc., 2005. 522 p.
6. Lipatnikov A. N. Fundamentals of premixed turbulent combustion. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012. 548 p.
7. Фролов С. М. Влияние турбулентности на среднюю скорость химических превращений: обзор // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 1. С. 43–58.
8. Cheng T. S., Wehrmeyer J. A., Pitz R. W., Jarrett O., Jr., Northam G. B. Raman measurement of mixing and finite-rate chemistry in a supersonic hydrogen–air diffusion flame // Combust. Flame, 1994. Vol. 99. No. 1. P. 157–173.
9. Magre P., Moreau P., Collin G., Borghi R., Péalat M. Further studies by CARS of premixed turbulent combustion in a high velocity flow // Combust. Flame, 1988. Vol. 71. No. 2. P. 147–168.
10. Власенко В. В. О математическом подходе и принципах построения численных методологий для пакета прикладных программ EWT–ЦАГИ // Практические аспекты решения задач внешней аэродинамики двигателей летательных аппаратов в рамках осредненных по времени уравнений Навье–Стокса: Труды ЦАГИ, 2007. Вып. 2671. С. 20–85.
11. 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.
12. Chomiak J., Karlsson A. Flame liftoff in diesel sprays // Symposium (International) on Combustion, 1996. Vol. 26. No. 2. P. 2557–2564.
13. Petrova N. Turbulence–chemistry interaction models for numerical simulation of aeronautical propulsion systems. Ecole Polytechnique, 2015. Ph.D. Thesis. 319 p.
14. Moule Y., Sabel'nikov V., Mura A. Modelling of self-ignition processes in supersonic non premixed coflowing

*Описанные в статье численные исследования поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации (договор № 14.G39.31.0001 от 13 февраля 2017 г.). Авторы благодарны С. М. Фролову (ИХФ РАН) за помощь с выбором подходящей модели горения метана.

¹Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); Московский физико-технический институт (МФТИ), vlasenko.vv@yandex.ru

²Московский физико-технический институт (МФТИ); Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), bucha13@inbox.ru

³ONERA — Французская аэрокосмическая лаборатория; Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), vladimir.sabelnikov@onera.fr

⁴Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), anja.shiryeva@gmail.com

- jets based on a PaSR approach. AIAA Paper No. 2011-2396, 2011. 9 p.
15. *Moule Y., Sabelnikov V., Mura A.* Highly resolved numerical simulation of combustion in supersonic hydrogen–air coflowing jets // *Combust. Flame*, 2014. Vol. 161. No. 10. P. 2647–2668.
 16. *Evans J., Schexnayder C., Beach H.* Application of a two-dimensional parabolic computer program to prediction of turbulent reacting flows. NASA Technical Paper 1169, 1978. 56 p.
 17. *Shiryayeva A., Sabelnikov V.* Critical analysis of classical turbulent combustion experiments on the basis of RANS simulations // *AIP Conf. Proc.*, 2018. Vol. 2027. No. 1. P. 030078.
 18. *Moule Y.* Modélisation et Simulation de la Combustion dans les Écoulements Rapides. Applications aux Superstatoréacteurs. Poitiers: L'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 2013. 226 p.
 19. *Davidenko D., Gökalp I., Dufour E., Magre P.* Numerical simulation of hydrogen supersonic combustion and validation of computational approach. AIAA Paper No. 7033, 2003. 11 p.
 20. *Власенко В. В.* О различных способах определения теплового эффекта и полноты сгорания в потоке реагирующего газа // *Ученые записки ЦАГИ*, 2014. Т. XLV. № 1. С. 1–25.
 21. *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. 117–129.
 22. *Хитрин Л. Н.* Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957. 452 с.
 23. *Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Бородачев В. Я., Волынский М. С., Прудников А. Г.* Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964. 527 с.
 24. *Прудников А. Г., Волынский М. С., Сагалович В. Н.* Процессы смесеобразования и горения в воздушно-реактивных двигателях. — М.: Машиностроение, 1971. 355 с.
 25. *Sabel'nikov V., Brossard C., Orain M., Grisch F., Barat M., Ristori A., Gicquel P.* Visualization study of thermoacoustic instabilities in a backward-facing step stabilized lean-premixed flame in high turbulence flow // 10th Conference (International) on Fluid Control, Measurements, and Visualization. — Moscow, 2009. 13 p.

Поступила в редакцию 25.12.18