

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО РЕАГИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ, СОВМЕЩЕННЫМ С МЕТОДОМ МОНТЕ КАРЛО ДЛЯ РАСЧЕТА ПОДСЕТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ\*

Р. Р. Тухватуллина<sup>1</sup>, В. С. Иванов<sup>2</sup>, С. М. Фролов<sup>3</sup>, Б. Басара<sup>4</sup>

**Аннотация:** Разработаны алгоритм и вычислительная программа для расчета сжимаемых турбулентных реагирующих течений комбинированным методом крупных вихрей с замыканием подсеточных турбулентных потоков с помощью отфильтрованной совместной функции плотности вероятностей скорости и скалярных переменных (Large Eddy Simulation / Velocity-Scalar-Mass-Filtered Density Function, LES/VSMFDF). Подсеточные турбулентные напряжения и подсеточные потоки массы и энергии моделируются с помощью взаимодействующих частиц, отражающих мгновенные локальные термохимические состояния потока. Вычислительная программа использована для решения трех задач: (1) об эволюционирующем изотермическом слое смешения; (2) о слое смешения с химическими превращениями; (3) об обтекании квадратного цилиндра воздушным потоком. Проведено сравнение полученных результатов с прямым численным моделированием (Direct Numerical Simulation, DNS) и с моделированием по методу крупных вихрей с замыканием подсеточных турбулентных напряжений по Смагоринскому (LES / Smagorinsky Subgrid Model, LES/SSM). В задаче об обтекании квадратного цилиндра турбулентным воздушным потоком с числом Рейнольдса 22000 проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными как по полям средней и пульсационной скорости, так и по коэффициенту сопротивления.

**Ключевые слова:** турбулентное течение; отфильтрованная функция плотности вероятности; метод крупных вихрей; метод Монте Карло; слой смешения

**DOI:** 10.30826/CE18110209

### Литература

1. Белоцерковский Б. П., Опарин А. М., Четкин В. М. Турбулентность: новые подходы. — М.: Наука, 2003. 286 с.
2. Givi P. Model-free simulations of turbulent reactive flows // Prog. Energ. Combust., 1989. Vol. 15. No. 1. P. 1–107.
3. Pope S. B. Computations of turbulent combustion: Progress and challenges // Symposium (International) on Combustion. — Elsevier, 1991. Vol. 23. No. 1. P. 591–612.
4. Sheikhi M. R. H., Drozda T. G., Givi P., Pope S. B. Velocity-scalar filtered density function for large eddy simulation of turbulent flows // Phys. Fluids, 2003. Vol. 15. No. 8. P. 2321–2337.
5. Sheikhi M. R. H., Drozda T. G., Givi P., Jaber F. A., Pope S. B. Large eddy simulation of a turbulent non-premixed piloted methane jet flame (Sandia Flame D) // Proc. Combust. Inst., 2005. Vol. 30. No. 1. P. 549–556.
6. Givi P. Filtered density function for subgrid scale modeling of turbulent combustion // AIAA J., 2006. Vol. 44. No. 1. P. 16–23.
7. Haji-Sheikhi M.-R. Joint velocity scalar filtered density function for large eddy simulation of turbulent reacting flows. University of Pittsburgh, 2006. Diss.
8. Gicquel L. Y., Givi P., Jaber F. A., Pope S. B. Velocity filtered density function for large eddy simulation of turbulent flows // Phys. Fluids, 2002. Vol. 14. No. 3. P. 1196–1213.
9. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment // Mon. Weather Rev., 1963. Vol. 91. No. 3. P. 99–164.
10. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Neuhaus M. G., Tatshl R. A joint velocity-scalar PDF method for modeling premixed and non-premixed combustion // Advanced computation and analysis of combustion / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, P. Givi. — М.: ENAS Publ., 1997. P. 537–562.

\*Работа частично выполнена за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011 «Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами», номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5.

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, tukhtatullinarr@gmail.com

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

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

<sup>4</sup>AVL LIST GmbH, Грац, Австрия, branislav.basara@avl.com

11. *Trias F. X., Gorobets A., Oliva A.* Turbulent flow around a square cylinder at Reynolds number 22,000: A DNS

study // *Comput. Fluids*, 2015. Vol. 123. P. 87–98.

*Поступила в редакцию 23.05.18*

# SIMULATION OF TURBULENT REACTIVE FLOW BY THE LARGE EDDY SIMULATION METHOD COMBINED WITH THE MONTE-CARLO METHOD FOR CALCULATING SUBGRID STRESSES

R. R. Tikhvatullina<sup>1</sup>, V. S. Ivanov<sup>1</sup>, S. M. Frolov<sup>1</sup>, and B. Basara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>AVL LIST GmbH, 1 Hanz List Pl., Graz 8020, Austria

**Abstract:** The algorithm and computational program are developed for modeling compressible turbulent reactive flows by the LES/VSFMD (Large Eddy Simulation coupled with the Velocity-Scalar Filtered Mass Density Function) method. Subgrid turbulent stresses and subgrid turbulent mass and energy fluxes are modeled by interacting particles representing local instantaneous thermochemical states of the flow. The computational program was used to solve three problems: (i) the problem of the evolving isothermal mixing layer; (ii) the problem of the mixing layer with chemical reactions; and (iii) the problem of the airflow around the square cylinder. Results were compared with the Direct Numerical Simulation and with the simulation by LES/SSM (LES coupled with the Smagorinsky model for the subgrid turbulent stresses) method. In the problem of the airflow around the square cylinder at Reynolds number of 22 000, the results of numerical calculations are compared with the experimental data for the fields of mean and pulsating velocity and for the drag coefficient.

**Keywords:** turbulent flows; Large Eddy Simulation; Filtered Density Function; Monte-Carlo method, mixing layer

**DOI:** 10.30826/CE18110209

## Acknowledgments

This work is partly supported by the subsidy given to the N. N. Semenov Institute of Chemical Physics to implement the state assignment on the topic No. 0082-2016-0011 “Fundamental studies of conversion processes of energetic materials and development of scientific grounds of controlling these processes” (State Registration No. AAAA-A17-117040610346-5).

## References

1. Belotserkovskiy, B. P., A. M. Oparin, and V. M. Chechetkin. 2003. *Turbulentnost': novye podhody* [Turbulence — new approaches]. Moscow: Nauka. 286 p.
2. Givi, P. 1989. Model-free simulations of turbulent reactive flows. *Progr. Energ. Combust.* 15(1):1–107.
3. Pope, S. B. 1991. Computations of turbulent combustion: Progress and challenges. *Symposium (International) on Combustion*. Elsevier. 23(1):591–612.
4. Sheikhi, M. R. H., T. G. Drozda, P. Givi, and S. B. Pope. 2003. Velocity-scalar filtered density function for large eddy simulation of turbulent flows. *Phys. Fluids* 15(8):2321–2337.
5. Sheikhi, M. R. H., T. G. Drozda, P. Givi, F. A. Jaber, and S. B. Pope. 2005. Large eddy simulation of a turbulent nonpremixed piloted methane jet flame (Sandia Flame D). *Proc. Combust. Inst.* 30(1):549–556.
6. Givi, P. 2006. Filtered density function for subgrid scale modeling of turbulent combustion. *AIAA J.* 44(1):16–23.
7. Haji-Sheikhi, M.-R. 2006. Joint velocity scalar filtered density function for large eddy simulation of turbulent reacting flows. University of Pittsburgh. Diss.
8. Gicquel, L. Y., P. Givi, F. A. Jaber, and S. B. Pope. 2002. Velocity filtered density function for large eddy simulation of turbulent flows. *Phys. Fluids* 14(3):1196–1213.
9. Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* 91(3):99–164.
10. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, M. G. Neuhaus, and R. Tatshl. 1997. A joint velocity-scalar PDF method for modeling premixed and non-premixed combustion. *Advanced computation and analysis of combustion*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and P. Givi. Moscow: ENAS Publ. 537–562.
11. Trias, F. X., A. Gorobets, and A. Oliva. 2015. Turbulent flow around a square cylinder at Reynolds number 22,000: A DNS study. *Comput. Fluids* 123:87–98.

Received May 23, 2018

## Contributors

**Tukhvatullina Ruzana R.** (b. 1988) — junior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; tukhvatullinarr@gmail.com

**Ivanov Vladislav S.** (b. 1986) — 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; ivanov.vls@gmail.com

**Frolov Sergey M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, 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 (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Basara Branislav** (b. 1964) — PhD, Doctor hab., chief developer, AVL LIST GmbH, 1 Hanz List Pl., Graz 8020, Austria; branislav.basara@avl.com