

О ВЛИЯНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ НА СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Нужнов Ю.В.¹, Кабак М.Т.¹, Бибосынов А.Ж.²

¹КазНУ им. Аль-Фараби, г. Алма-Ата. nuzhnov@mail.ru

²Национальный центр космических исследований и технологий, г. Алматы

Ключевые слова: реактивный двигатель; камера сгорания; турбулентные течения; статистическое моделирование.

Проектирование высокоэффективных реактивных двигателей тесно связано с качеством статистического моделирования диффузионного турбулентного горения, образованного в результате раздельной подачи горючего и окислителя в камеру сгорания. При этом первым основным этапом такого моделирования является моделирование структуры турбулентного течения в зоне смешения спутных потоков химических реагентов; причем это относится как к крупномасштабной (энергосодержащей), так и мелкомасштабной (диссипативной) структуре турбулентности. В то же время в теории статистического моделирования крупномасштабной структуры турбулентных течений до сих пор нет ясного ответа на вопрос о причинах низкого качества метода Рейнольдса RANS, – как известно, построенные по этому методу модели RANS не обеспечивают требуемую в настоящее время точность расчета статистических (в особенности «пульсационных») характеристик таких течений, [1-4].

Другим вопросом остается вопрос о пригодности статистической теории К62, разработанной А.Н. Колмогоровым для мелкомасштабной турбулентности с локально изотропной структурой, – как известно, результаты экспериментальной верификации теории К62 применительно к мелкомасштабной структуре развитых турбулентных течений выявили определенные дефекты этой теории, [5-8]).

Поставленные вопросы относятся к коренным вопросам статистической гидромеханики и, поэтому, их решение будет способствовать дальнейшему повышению качества моделирования турбулентных течений. При этом исследования последних десятилетий указывают на то, что эффективность статистического моделирования как крупномасштабной, так и мелкомасштабной структуры таких течений существенно зависит от гидродинамических эффектов перемежаемости случайных гидродинамических полей.

Результаты статистического моделирования крупномасштабной структуры турбулентных течений, выполненные методом ASMTurb [4, 9] на примере турбулентного течения в зоне смешения спутных потоков, представлены на Рис.1 и Рис.2. Как видно, рассчитанные с учетом эффектов внешней перемежаемости (т.е. перемежаемости турбулентно/нетурбулентной жидкости) кривые соответствуют известным (см., например, [3]) экспериментальным данным.

Что касается моделирования мелкомасштабной структуры, то здесь следует учитывать влияние эффектов внутренней перемежаемости, т.е. перемежаемости диссипативной/недиссипативной жидкости турбулентного течения, [8]. При этом аналогом «экспоненциального» коэффициента Колмогорова μ , входящего в структурные функции К62, является его статистическая величина, полное среднее которой в режиме локальной изотропии диссипативной жидкости может быть записано согласно теории ASMTurbS [8] в виде:

$$\langle \mu \rangle_{iz} = \gamma_d \langle \mu \rangle_d + (1 - \gamma) \langle \mu \rangle_n \quad (1)$$

где γ_d – коэффициент перемежаемости диссипативной жидкости, связанный с коэффициентом внешней перемежаемости турбулентной жидкости γ выражением $\gamma_d = \gamma \gamma_{td}$, γ_{td} – коэффициент внутренней перемежаемости [8]; $\langle \mu \rangle_d = 0.145$ и $\langle \mu \rangle_n = 0.31$ – универсальные постоянные. Аналогом «второго» коэффициента Колмогорова C_ϵ является статистическая величина этого коэффициента, полное среднее которого в режиме локальной изотропии записывается как:

$$\langle C_\varepsilon \rangle_{iz} = C_{\varepsilon S} \gamma_d \frac{\langle \mu \rangle_d}{3}^{-1} (l/L) \langle \mu \rangle_{iz}^{-\langle \mu \rangle_d} \quad (2)$$

где $C_{\varepsilon S} = 0.9$ и $l/L = 3 \cdot 10^{-6}$, – значения этих параметров выбираются из условия наилучшего совпадения расчетной кривой с экспериментальными данными [1, 5].

Результаты расчётов коэффициентов $\langle \mu \rangle_{iz}$ (1) и $\langle C_\varepsilon \rangle_{iz}$ (2) представлены на 0 и 0. Видно, что учет эффектов внутренней перемежаемости приводит к существенному уточнению этих коэффициентов, – для экспоненциального коэффициента $\mu = \langle \mu \rangle_{iz}$ получена расчетная кривая, которая хорошо совпадает с опытными данными, тогда как для «второго» коэффициента Колмогорова $C_\varepsilon = \langle C_\varepsilon \rangle_{iz}$ получено существенное уточнение по сравнению с моделью [5].

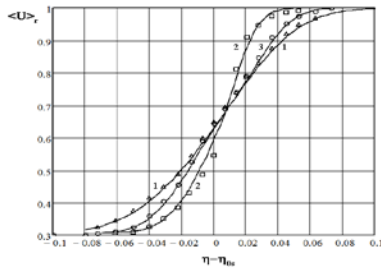


Рис. 1 Профили условного и полного среднего безразмерной продольной скорости ASMTurb $\langle U \rangle_r = \langle u \rangle_r / u_1$: 1- Δ - $\langle U \rangle_t$; 2- \square - $\langle U \rangle_n$; 3- \circ - $\langle U \rangle = \langle u \rangle / u_1$, u_1 и u_2 – скорости спутных потоков, $u_2 / u_1 = 0.3$, $\Delta U = u_2 - u_1$. Здесь и далее кривые линии – расчёт, значки – известные в литературе опытные данные

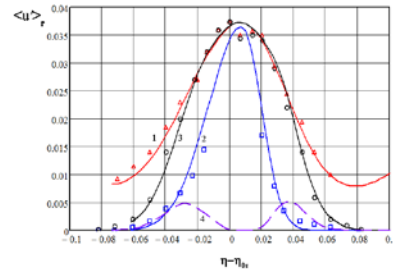


Рис.2. Профили условного и полного среднего безразмерной интенсивности пульсаций продольной скорости ASMTurb $\langle u'_r \rangle = \langle u'^2 \rangle_r / \Delta U^2$: 1- Δ - $\langle u'_t \rangle$; 2- \square - $\langle u'_n \rangle$; 3- \circ - $\langle u'_r \rangle = \langle u'^2 \rangle / \Delta U^2$; 4 - $\langle u'^2 \rangle_{dop} / \Delta U^2$

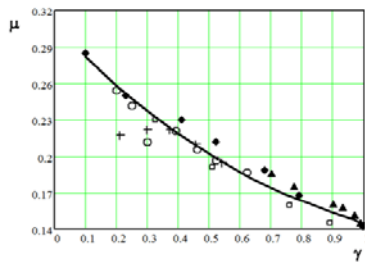


Рис.3 Распределения значений экспоненциального коэффициента Колмогорова $\mu = \langle \mu \rangle_{iz}$ в зависимости от величины коэффициента внешней перемежаемости

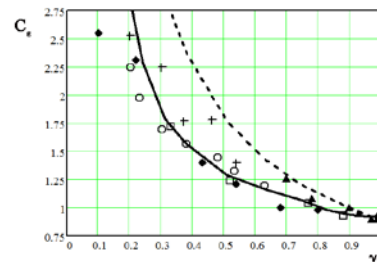


Рис. 4. Распределения значений «второго» коэффициента Колмогорова $C_\varepsilon = \langle C_\varepsilon \rangle_{iz}$ в зависимости от величины коэффициента внешней перемежаемости. Пунктирная кривая – расчёт по модели [5], построенной в предположении локальной изотропии турбулентной жидкости

Таким образом, учет эффектов внешней перемежаемости в методе ASMTurb дает более высокое (по сравнению с RANS) качество статистического моделирования крупномасштабной структуры турбулентных течений; такое качество достигается за счет возможности автономного моделирования течений турбулентной и нетурбулентной жидкости, т.е. за счет задания различных гипотез «замыкания» каждой из систем дифференциальных уравнений ASMTurb.

В случае моделирования мелкомасштабной структуры развитых турбулентных течений выясняется, что учет эффектов внутренней перемежаемости диссипативной жидкости турбулентного течения дает зависимость коэффициентов Колмогорова (в отличие от их постоянных значений в теории K62) от величины коэффициента перемежаемости (внутренней или при пересчете [8] – внешней). Хорошее соответствие расчетных кривых и опытных данных указывает на то, что как теория Колмогорова K62, так и экспериментальные данные Кузнецова, Прасковского и Сабельникова [1, 5] справедливы только для диссипативной жидкости, структура которой считается локально изотропной. В то же время мелкомасштабная структура турбулентной жидкости на самом деле не является однородной и локально изотропной

(например, [6]). Однако для разработки соответствующей статистической теории (предварительные результаты которой были получены в [8]) и ее верификации требуются данные специальных экспериментальных исследований, которые в настоящее время отсутствуют.

Список литературы

1. Kuznetsov V. R., Sabel'nikov V. A. Turbulence and Combustion. New York: Hemisphere, 1990. 361p.
2. Нужнов Ю.В. Статистическое моделирование перемежающихся турбулентных течений. Алматы: Казак университеті, 2015. 300с.
3. Nuzhnov Yuriy. Statistical Modeling for the Energy-Containing Structure of Turbulent Flows. In Turbulence Modeling Approaches, K. Volkov (ed.), Current State, Development Prospects, Applications. Published by inTech, 2017. Chapter 4, pp.99-122.
4. Nuzhnov Yu.V. The Method of Autonomous Statistical Modeling ASMTurb and its Testing on the Example of Classical Turbulent Flows// ASME Congress (IMECE). Quebec, Montreal Volume 7: Fluids Engineering Systems and Technologies. 2014. 10p.
5. Kuznetsov V. R., Praskovsky A. A. and Sabelnikov V. A. Fine-scale turbulence structure of intermittent shear flow. J. Fluid Mech., 1992. 243, pp.273-295.
6. Antonia R., Anselmet F. and Chambers A. 1986. Assessment of local isotropy using measurements in a turbulent plane jet// J. Fluid Mech. Vol.163. pp.365-391.
7. Dhawal Buaria, Katepalli R. Sreenivasan. Dissipation range of the energy spectrum in high Reynolds number turbulence, Physics Subject Headings (PhySH). 2020. 8p.
8. Nuzhnov Yu.V. Some results of statistical modeling of the small-scale turbulence structure revealed with consideration of intermittency// IMECE. - California, San Diego.: Fluids Engineering Systems and Technologies. 2013. Vol.7A. 7 p.
9. Nuzhnov Yu.V. 2013. Method of autonomous statistical modeling of turbulent flows, Certificate of authorship 0010816. publ. 10.21.2013, Bul. No. 1392. 6 p.

Сведения об авторах

Нужнов Юрий Васильевич, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, профессор КазНУ им. Аль-Фараби. Область научных интересов: теоретические исследования в области моделирования турбулентных течений и турбулентного горения.

Кабак Мухтар Толеуулы, докторант КазНУ им. Аль-Фараби. Область научных интересов: теоретические исследования в области моделирования мелкомасштабной турбулентности.

Бибосынов Асылхан Жанибекович, доктор философии (PhD), Заместитель председателя Правления АО «Национальный центр космических исследований и технологий». Область научных интересов: развитие современных вычислительных методов в механике.

ON THE INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC INTERMITTENCY EFFECTS ON STATISTICAL MODELING OF DEVELOPED TURBULENT FLOWS

Nuzhnov Yu.V.¹, Kabak M.T.¹, Bibossinov A.Zh.²

¹KazHU al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, nuzhnov@mail.ru

²National center of space research and technology, Almaty, Kazakhstan

Keywords: jet engine, combustion chamber, turbulent flows, statistical modeling.

An analysis of the hydrodynamic intermittency effects is presented, which showed a significant influence of such effects on the statistical modeling of developed turbulent flows.