



УДК: 536.7, 004.94

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

MODERN METHODS OF NUMERICAL MODELING COMBUSTION PROCESSES

Южаков Иван Владимирович, студент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: iv.uzh@gmail.ru, Тел.: +7(912)272-08-83

Левин Евгений Иосифович, канд. техн. наук, преподаватель каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: e.i.levin@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-47-31

Ivan V. Yuzhakov, Student, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: iv.uzh@gmail.ru. Ph.: +7(912)272-08-83

Yevgeniy I. Levin, PhD in Technical Sciences, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: e.i.levin@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-47-31

Аннотация: В данной работе выполнен обзор современных методов математического моделирования турбулентных процессов горения для камер сгорания газотурбинных установок (КС ГТУ). Определены математические условия и ограничения методов, основанных на решении системы уравнений Навье-Стокса. Проведено сравнение наиболее эффективных систем моделирования, рассмотрены их математические основы, приведены границы применимости, а также преимущества и недостатки для расчета реальных КС.

Abstract: In this abstract, the modern methods of mathematical modeling of turbulent combustion processes for combustion chambers of gas turbine units. The mathematical conditions and limitations of methods based on the solution of the Navier-Stokes system of equations are determined. The most effective modeling systems are compared, their mathematical foundations are considered, the applicability limits are determined, and the advantages and disadvantages for calculating real combustion chambers are determined.

Ключевые слова: моделирование, ГТУ, модель горения, камера сгорания, турбулентное горение, уравнения Навье-Стокса

Key words: modeling, gas turbine engine, combustion model, combustion chamber, turbulent combustion, Navier-Stokes equations

Постоянно растущая потребность в разработке и последующем внедрении энергоустановок на основе парогазовых циклов обусловлена их высокой эффективностью, экономичностью и маневренностью. Однако разработка и изготовление установок для промышленного применения является капиталозатратным, трудоемким и требующим существенных вычислительных затрат процессом, поэтому существенную роль в процедуре проектирования элементов парогазовых установок (ПГУ) занимает математическое моделирование.

Особая роль в моделировании элементов ПГУ отводится камере сгорания газотурбинной установки (КС ГТУ), что в первую очередь связано с ее существенным вкладом в коэффициент полезного действия (КПД) всего цикла.

На сегодняшний день существует ряд эффективных моделей горения в КС, обеспечивающих возможность проведения расчетов многочисленных параметров процесса: от температурных полей и распределений скоростей потоков до моделирования эмиссионных характеристик и акустических явлений. Однако каждая из существующих моделей ограничена условиями среды, формой КС, характером процесса горения, требованиями к точности и скорости вычислений, а также иными предусловиями моделируемой камеры сгорания, что объясняет отсутствие универсальной расчетной системы.

Задачами данной работы являются выбор системы моделирования турбулентного горения, сравнение наиболее эффективных моделей, изучение границ их применимости и необходимых условий для

осуществления расчетов камеры сгорания промышленной газовой турбины, работающей на синтез-газе.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ И ГРАНИЦЫ ИХ ПРИМЕНИМОСТИ

В настоящее время существует ряд моделей турбулентного горения, отличающиеся друг от друга математической сложностью, а значит величиной требуемых вычислительных ресурсов, и точностью описания турбулентных процессов. Математической основой для моделей служат уравнения Навье-Стокса (1), последовательное решение и упрощение которых, с введением дополнительных условий и ограничений, приводит к образованию системы моделирования. Так на сегодняшний день наиболее распространенными являются $k - \epsilon$, $k - \omega$ и LES модели, по повышению сложности.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div } \omega \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{dv}{dt} &= Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div } \omega \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{d\omega}{dt} &= Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div } \omega \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right], \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

Система уравнений Навье-Стокса, приведенная к двум нелинейным диффузионным уравнениям, учитывающим флуктуации средней скорости турбулентных потоков, представляет собой семейство моделей $k - \epsilon$ (2), где k - массовая плотность турбулентной энергии, ϵ - скорость ее диссипации. Особенностью данной системы является каскадность ее решения, что наиболее удобно для применения в программных пакетах для моделирования. Кроме того, важным преимуществом является высокая скорость расчета моделей посредством $k-\epsilon$ с достаточно высокой точностью.

Модели $k-\epsilon$ имеют большое число как высоко-, так и низкорейнольдсовых модификаций, таким образом данный тип моделирования применим, как к центральной части турбулентного потока, так и в пограничном слое. Недостатки системы $k-\epsilon$ в невозможности моделирования физических систем сложной геометрии, сильно турбулизованных потоков и пристеночных

областей.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk}{dt} &= \nabla \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \epsilon - f_k \\ \frac{d\epsilon}{dt} &= \nabla \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_k - C_2 f_2 \frac{\epsilon^2}{k} - f_\epsilon \end{aligned} \right\} (2)$$

где $v_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$.

При аналогичном преобразовании уравнений Навье-Стокса, с заменой решения уравнения диссипации на уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии, формируется система $k - \omega$ (3). Параметр ω здесь представляет собой удельную диссипацию.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dk}{dt} &= \nabla \left((\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k \right) + P_k - \rho \beta^* \omega k \\ \rho \frac{D\omega}{dt} &= \nabla \left((\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 \end{aligned} \right\} (3)$$

Данная модель учитывает низкорейнольдсовые эффекты, влияние сжимаемости и распространение сдвиговых возмущений, что делает систему $k - \omega$ применимой для пристеночной области, а также для центральной части потока при моделировании КС сложной формы. Недостатками системы $k - \omega$ являются более высокая сложность расчетов, а также узкая область применения.

Наиболее сложные с математической точки зрения преобразования описывает в себе систему LES («Метод крупных вихрей»). Основная идея LES состоит в частичном осреднении уравнений Навье-Стокса так, что крупные вихри с диапазоном размеров от макро- до вихрей инерционного интервала рассчитываются как в методе прямого численного моделирования, а влияние мелких диссипативных вихрей учитывается в уравнениях движения вязкой жидкости дополнительными напряжениями, определяемыми по простым зависимостям, полученным строго из теории локально изотропной турбулентности.

В рамках LES сглаживаются мелкие вихри, но крупные, наиболее важные с энергетической точки зрения потоки получаются прямым расчетом.

Расчеты с помощью LES в настоящее время остаются очень трудоемкими, дорогостоящими, что ограничивает широкое практическое применение данного метода

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Применимость данных моделей ограничивается областью и точностью моделирования, располагаемой вычислительной мощностью и самой формой КС. В зависимости от ограничений и условий, накладываемых на модель, определяется область ее применимости.

Область применения модели $k-\epsilon$ определяется геометрией течения: данный тип моделирования проявляет неопределенность при описании турбулентных потоков сложной геометрии; а также параметрами, которые задаются для моделирования течения в пограничном слое: в этом случае функция может «захватить» область, расположенную вдали от стенок, что нарушает модель турбулентного потока в центральной части.

Использование системы $k-\epsilon$ характерно для моделирования эмиссионных характеристик и полей температуры, давления, скорости и концентрации, а также определения зоны тепловыделения [1,2]. Наиболее часто модель $k-\epsilon$ встречается при расчете параметров камер сгорания простой геометрии средних размеров с вводимыми осевыми и вихревыми потоками [3], однако существуют случаи применения в пристеночной области, как показано в [4] при расчете системы охлаждения КС. На рис. 1 представлены результаты верификации модели $k-\epsilon$ при расчете температурных профилей поперечного сечения камеры сгорания.

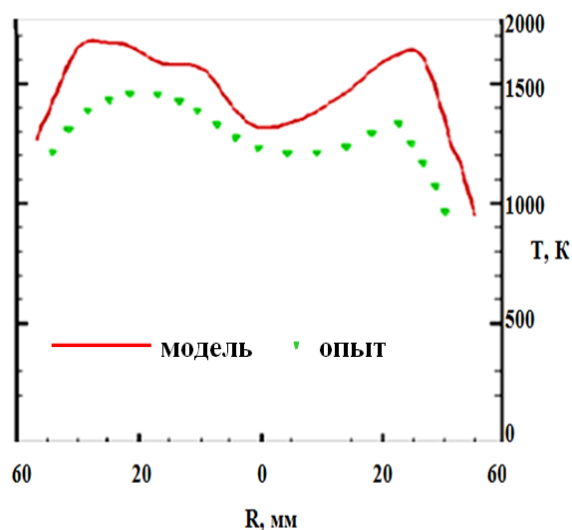


Рис. 1. Результаты верификации модели $k-\epsilon$ при расчете температурных профилей поперечного сечения камеры сгорания

Система $k-\omega$ применяется для моделирования потоков в пограничном слое, для описания турбулентности в центральной части КС со сложной геометрией [1,5], с целью получения формы пристеночных потоков в процессах со сложной закруткой и сильным градиентом

температур. Данная модель позволяет выполнить оптимизацию эффективного режима горения, распределения температур, объемов выбросов и определить необходимые условия для минимизации энтропии [6]. На рис. 2 представлено сравнение изоэнтропной эффективности горения при 2-D и 3-D моделировании $k-\omega$.

Применение LES для математического описания процессов горения и турбулентного течения позволяет создавать как стационарные, так и более сложные – нестационарные модели. Так LES позволяет получить трехмерную модель горения топливных высокотурбулентных потоков [7], а также произвести расчет многозонной камеры сгорания, используемой для восстановления попутного и других низкокалорийных газов [8].

Кроме того, система LES позволяет исследовать акустические процессы в камерах сгорания различных типов: с организацией обратного цикла и без него [9]. Данные исследования с помощью модели LES позволяют наряду с классическими параметрами изучать процессы хемолюминесценции внутри КС.

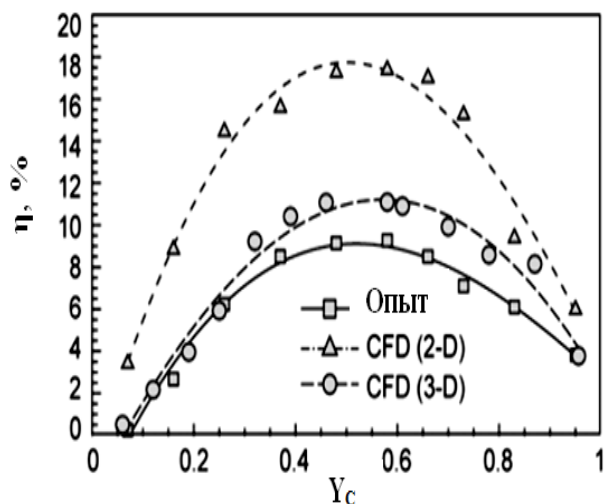


Рис. 2. Сравнение изоэнтропной эффективности (η) при изменении массового соотношения (Y_c) газовых составляющих, полученной экспериментально и с помощью 3D и 2D моделей

Следует отметить, что все перечисленные математические модели турбулентных процессов показали высокую точность при сравнении с экспериментальными данными, что говорит о высоком потенциале предварительного моделирования горения различных видов топлива в КС ГТУ.

В данной работе проведено исследование наиболее распространенных на сегодняшний день моделей горения: $k-\epsilon$, $k-\omega$ и LES. Выполнено их сравнение по сложности преобразований и энергоёмкости математического решения, по ограничениям в применимости и обширности областей использования. По результатам исследования сделан вывод о преимуществе модели $k-\epsilon$ для расчета неравномерности распределения температур на выходе из камеры сгорания промышленной ГТУ, а также для оценки уровня выбросов оксидов азота, что обусловлено высокой точностью и относительно малыми затратами вычислительных мощностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сабирзянов А.Н., Явкин Б.В., Александров Ю.Б., Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Эмиссионные характеристики и температурная неравномерность на выходе из камеры сгорания ГТУ/ А.Н. Сабирзянов, Б.В. Явкин, Ю.Б. Александров, А.Н. Маркушин, А.В. Бакланов//Вестник СГАУ, №3 (41), 2013, часть 2 – С.165-172
2. Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД /Б. Г. Мингазов, В. Б. Явкин, А. Н. Сабирзянов, А. В. Бакланов// Вестник СГАУ, №5 (29), 2011 – С. 208-214
3. Shirinzadeh F., Barough R.M., Orang A.A. A parametric study on the factors affecting gas turbine combustion using a CFD-based approach/ F. Shirinzadeh, R.M. Barough, A.A. Orang// Bulgarian Chemical Communications, Vol.47, 2015 – PP. 231-238
4. Rahbar N., Taherian M., Shateri M., Valipour M. S. Numerical investigation on flow behavior and energy separation in a micro-scale vortex tube/ N. Rahbar, M. Taherian, M. Shateri, M.S. Valipour // Thermal science, Vol. 19, No. 2, 2015 - PP. 619-630
5. Reichling G. Development of numerical methods for the calculation of thermo-acoustic interactions in gas turbine combustion chambers/ G. Reichling// Institute of combustion technology for aerospace engineering university of Stuttgart, 2014 – P. 254
6. Torkzadeh M.M., Bolourchifard F., Amani E. An investigation of air-swirl design criteria for gas turbine combustors through a multi-objective CFD optimization/ M.M. Torkzadeh, F. Bolourchifard, E. Amani// Fuel 186, 2016 – PP. 734–749
7. Бачев Н.Л., Бетинская О.А., Бульбович Р.В. Стационарная трехмерная модель горения топливных газов/Н.Л. Бачев, О.А. Бетинская, Р.В. Бульбович// Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника №41, 2015 – С. 103-118
8. Bachev N. L., Betinskaya O. A., Bulbovich R. V. Computational modeling of the working process in the combustion chamber for casing-head gas recovery /N. L. Bachev, O. A. Betinskaya, and R. V. Bulbovich//Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 89, № 1, 2016 – PP. 221-229
9. Sjoerd P. Acoustic of turbulent non-premixed syngas combustion. Proefschrift/ P.Sjoerd. - Enschede, The Netherlands, 2007 – P. 205
10. Ben Sik Ali A., Wassim K., Mhiri H., Bournot P. Numerical investigations of cooling holes system role in the protection of the walls of a gas turbine combustion chamber/ A. Ben Sik Ali, W. Kriaa, H. Mhiri, P. Bournot// Heat mass transfer, № 48, 2012 – PP. 779–788
11. Chen X., Zheng H., Pan G., Jia X. Parametric modelling system of gas turbine combustor/ X. Chen, H. Zheng, G. Pan, X. Jia// Tehnički vjesnik, №21, 2014 – PP. 1213-1219