

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В МОДЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Борис Анатольевич КРЫЛОВ родился в 1935 г. в городе Шуя Ивановской обл. Ведущий научный сотрудник, докторант МАИ. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области газотурбинных двигателей, турбин, трехмерного моделирования течений. Автор более 180 научных работ. E-mail: agulnik@mai.ru

Boris A. KRYLOV, Ph.D., was born in 1935, in the Ivanovo Region. He is a Principal Research Associate at the MAI. His research interests are in gas-turbine engines, turbines, three-dimensional simulation of flows. He has published over 180 technical papers. E-mail: agulnik@mai.ru

Иван Иванович ОНИЩИК родился в 1934 г. в городе Бресте Белорусской ССР. Профессор МАИ. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области газотурбинных двигателей, камер сгорания, трехмерного моделирования течений. Автор более 70 научных работ. E-mail: agulnik@mai.ru

Ivan I. ONISHCHIK, Ph.D., was born in 1934, in Brest, Belorussian SSR. He is a Professor at the MAI. His research interests are in gas-turbine engines, combustion chamber, three-dimensional simulation of flows. He has published more than 70 technical papers. E-mail: agulnik@mai.ru

Александр Александрович ЮН родился в 1974 г. в городе Бекабаде Узбекской ССР. Ведущий инженер НПО «Сатурн». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области газотурбинных двигателей, камер сгорания, трехмерного моделирования течений. Автор более 20 научных работ. E-mail: alex@yun.su

Alexander A. YUN, Ph.D., Dr.-Eng., was born in 1974, in Bekabad, Uzbek SSR. He is a Principal Engineer at the Saturn Scientific Production Association. His research interests are in gas-turbine engines, combustion chambers, three-dimensional simulation of flows. He has published over 20 technical papers. E-mail: alex@yun.su

В статье представлены материалы по использованию комплекса Fastest-3D для моделирования турбулентных процессов с тепло-массообменом в модельных камерах сгорания и приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Some results are presented to demonstrate application of the Fastest-3D package for simulation of turbulent processes with heat and mass transfer in model combustion chambers. A comparison of numerical and experimental data is presented.

Ключевые слова: диффузор, тепло- и массообмен, рейнольдсовы напряжения, адиабатные граничные условия, эксперимент, охлаждение через щель и отверстия.

Key words: diffuser, heat and mass transfer, Reynolds stresses, adiabatic boundary conditions, experiment, cooling through slit and holes.

Условные обозначения

A_i, c_i — модельные константы;

c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

H — ширина канала, м;

D — диаметр отверстий, м;

\bar{G}_c — относительный расход холодного воздуха;

k — кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;

p — давление, Па;

P — член генерации турбулентности в уравнении переноса рейнольдсовых напряжений;

Re — число Рейнольдса;

T — температура, К;

T_c — температура холодного воздуха, К;

T_h — температура горячего воздуха, К;

$\bar{T}_c = T_c / T_h$ — безразмерная температура;

t — время, с;

\bar{q} — относительный скоростной напор;

u_i — компоненты скорости, м/с;

$\bar{u}'_i \bar{u}'_j$ — компоненты рейнольдсовых напряжений, м²/с²;

$\bar{u}'_j \bar{T}$ — турбулентный поток тепла, м·К/с;

x_i — координаты, м;

$\bar{x} = x_i / D$ — относительное расстояние от начала канала до оси струи;

δ_{ij} — символ Кронекера;
 ε — скорость диссипации кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^2$;
 μ — ламинарная динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$;
 μ_t — турбулентная динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$;
 ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 Pr_t — турбулентное число Прандтля;
 τ — временной масштаб турбулентности, с;
 $(\overline{\bullet})$ — осредненные или нормированные величины.

Введение

Использование расчетных методов в настоящее время становится одним из основных направлений исследования процессов, происходящих в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Течения в камерах сгорания газотурбинных двигателей представляют собой сложную систему закрученных потоков с поперечными и спутными струями в сочетании с процессом подготовки и горения смеси топлива с воздухом. В данной работе проведено исследование смешивания холодных и горячих потоков в модельных камерах сгорания.

Несмотря на огромный прогресс, достигнутый в моделировании крупных вихрей (LES), модели, базирующиеся на осредненных уравнениях Рейнольдса, в частности $k-\varepsilon$ модель, продолжают доминировать в сложных инженерных приложениях. В данной статье моделирование турбулентных течений выполнялось с явной алгебраической моделью рейнольдсовых напряжений (EARSМ) [1]. Явная алгебраическая модель рейнольдсовых напряжений позволяет обойти некоторые недостатки ряда популярных в индустрии моделей, базирующихся на гипотезе Буссинеска ($k-\varepsilon$ или $k-\omega$ модели), при сопоставимой скорости вычислений [2]. В отличие от работы [3], вместо градиентного предположения для моделирования процессов теплообмена использовалась явная алгебраическая модель переноса скаляра (EASFM), предложенная Wikstrom, Wallin & Johansson (WWJ) [4]. Расчеты проводились с использованием программного комплекса Fastest-3D [5], разработанного фирмой INVENT Computing GmbH (Германия). Fastest-3D является комплексом для расчета трехмерных течений и основан на методе дискретизации ограниченных объемов с гексаэдрными контрольными объемами, с неортогональной блочно-структурированной численной сеткой.

Теоретическая часть

Для расчетов турбулентного течения с теплопереносом использовались осредненные уравнения сохранения массы, импульса, энергии и уравнение состояния, представленные в работе [6].

Для замыкания уравнения импульса использовалась модель EARSМ (Wallin & Johansson) [1], записываемая в следующем виде:

$$a = \beta_1 S + \beta_2 \left(S^2 - \frac{1}{3} II_S I \right) + \beta_3 \left(\Omega^2 - \frac{1}{3} II_\Omega I \right) + \beta_4 (S\Omega - \Omega S) + \beta_5 (S^2\Omega - \Omega S^2) + \beta_6 \left(S\Omega^2 - \Omega^2 S - \frac{2}{3} I VI \right) + \beta_7 \left(S^2\Omega^2 + \Omega^2 S^2 - \frac{2}{3} I VI \right) + \beta_8 (S\Omega S^2 - S^2\Omega S^2) + \beta_9 (\Omega S\Omega^2 - \Omega^2 S\Omega) + \beta_{10} (\Omega S^2\Omega^2 - \Omega^2 S^2\Omega),$$

где $a = a_{ij} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}$ — тензор анизотропии рейнольдсовых напряжений;

$$S = S_{ij} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) — тензор скоростей деформации, нормированный к временному масштабу турбулентности τ ;$$

формации, нормированный к временному масштабу турбулентности τ ;

$$\Omega = \Omega_{ij} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) — тензор вектора завихренности, нормированный к турбулентному масштабу времени τ ;$$

ренности, нормированный к турбулентному масштабу времени τ ;

I — единичная матрица;

β_i — неизвестные коэффициенты; инварианты тензоров даны в [6].

Неизвестные коэффициенты β_i находятся из упрощенного алгебраического уравнения переноса рейнольдсовых напряжений, приведенного ниже [1]:

$$\left(A_3 + A_4 \frac{P}{\varepsilon} \right) a_{ij} = -A_1 S_{ij} + (a_{ik} \Omega_{kj} - \Omega_{ik} a_{kj}) - A_2 \left(a_{ik} S_{kj} + S_{ik} a_{kj} - \frac{2}{3} \delta_{ij} a_{ik} S_{ki} \right),$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 — модельные константы.

Для замыкания уравнения энергии использовалась модель EASFM (Wikstrom, Wallin & Johansson) [4]:

$$-\rho \overline{u'_i \phi'} = -(1 - c_{\phi 4}) B_{ij} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_k},$$

где матрица B вычисляется по формуле

$$B = \frac{\left(G^2 - \frac{1}{2} Q_1 \right) I - G (c_s S + c_\Omega \Omega) + (c_s S + c_\Omega \Omega)^2}{G^3 - \frac{1}{2} G Q_1 + \frac{1}{2} Q_2};$$

зависимые константы определяются по формулам $c_s = 1 - c_{\phi 2} - c_{\phi 3}$, $c_{\Omega} = 1 - c_{\phi 2} + c_{\phi 3}$;

параметр $G = \frac{1}{2} \left(2c_{\phi 1} - 1 - \frac{1}{r} - \frac{P}{\varepsilon} \right)$;

параметр $r = \frac{k_{\phi} / \varepsilon_{\phi}}{k / \varepsilon} \approx 0,55$;

параметры, получаемые из инвариантов:

$$Q_1 = c_s^2 II_s + c_{\Omega}^2 II_{\Omega}, \quad Q_2 = \frac{2}{3} c_s^3 III_s + 2c_s c_{\Omega}^2 IV;$$

модельные константы имеют следующие значения: $c_{\phi 1} = 4,51$, $c_{\phi 2} = -0,47$, $c_{\phi 3} = 0,02$, $c_{\phi 4} = 0,08$.

Для определения временного масштаба турбулентности решаются уравнения для кинетической энергии и диссипации, представленные в работе [6]. Модельные коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1
Модельные коэффициенты

A_1	A_2	A_3	A_4	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	c_{μ}	σ_k	σ_{ε}
1,2	0	1,8	2,25	1,44	1,92	0,09	1,0	1,3

Результаты

Перспективность применения явной алгебраической модели рейнольдсовых напряжений для скоростного поля и явной алгебраической модели переноса скаляра для температурного поля при исследовании процессов, протекающих в камерах сгорания газотурбинных двигателей, показана в работах [1, 2, 7, 8], поэтому в данной работе численное моделирование проведено с использованием данных моделей.

Экспериментальная модель [7] представляла собой канал квадратного сечения с сужающимся выходным устройством или конфузорной частью, по которому подавались продукты сгорания керосина в воздухе с температурой T_h . Такая экспериментальная модель является более приближенной к реальной камере сгорания, чем рассмотренный в работе [8] канал с постоянным сечением. В стенке канала располагались втулки с отверстиями, через которые подавался воздух с температурой T_c . В выходном сужающемся устройстве с помощью гребенки термопар снимались поля температур. Эксперименты проводились при давлении, близком к атмосферному, при скоростях течения горячего потока 30–40 м/с. Числа Рейнольдса, рассчитанные по высоте канала на входных участках моделей, лежали в диапазоне $Re = (0,7 \div 1,9) \cdot 10^5$.

Рассматривались три варианта модельных устройств камеры сгорания: с отверстием и сужающимся снизу-вверх выходным устройством; с отверстием и сужающейся с двух сторон конфузорной частью; с щелью и аналогичным выходным устройством, как и в первом случае. Ширина входного канала с отверстиями составляла 200 мм, а с щелью — 191,5 мм. Диаметр отверстий равнялся 30 мм, а высота щели — 2 мм. Геометрические параметры рассматриваемых модельных камер приведены на рис. 1. Степень конфузорности (отношение высот канала на входе и на выходе) $\bar{H}_{out} = 0,35$.

Газодинамические параметры сведены в табл. 2.

Таблица 2

Газодинамические параметры

Варианты	\bar{q}	\bar{T}_c	\bar{G}_c
I	2,19	0,579	0,078
II	2,05	0,551	0,036
III	1,69	0,526	0,030

На рис. 2 показан пример численной сетки для первого варианта. Количество контрольных объемов 38000, 42000 и 50000 для первого, второго и третьего вариантов соответственно. На стенках модельного выходного устройства заданы адиабатные условия.

На рис. 3 показано сравнение безразмерных профилей температур $\Theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$, полученных экспериментально (обозначено точками) и рассчитанных (сплошные линии) для различных вариантов (рис. 1, табл. 1) на различных расстояниях \bar{x} от оси струи для первых двух вариантов и на выходе модельной камеры сгорания для третьего варианта.

Выводы

Используемые в этой работе модели турбулентности и теплообмена удовлетворительно предсказывают температурный профиль во всех трех рассматриваемых случаях (с отверстием и сужающимся снизу-вверх выходным устройством; с отверстием и сужающейся с двух сторон конфузорной частью; с щелью и аналогичным выходным устройством, как и в первом случае). Имеется незначительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными, которого, вероятно, возможно избежать, используя Low-Re модели.

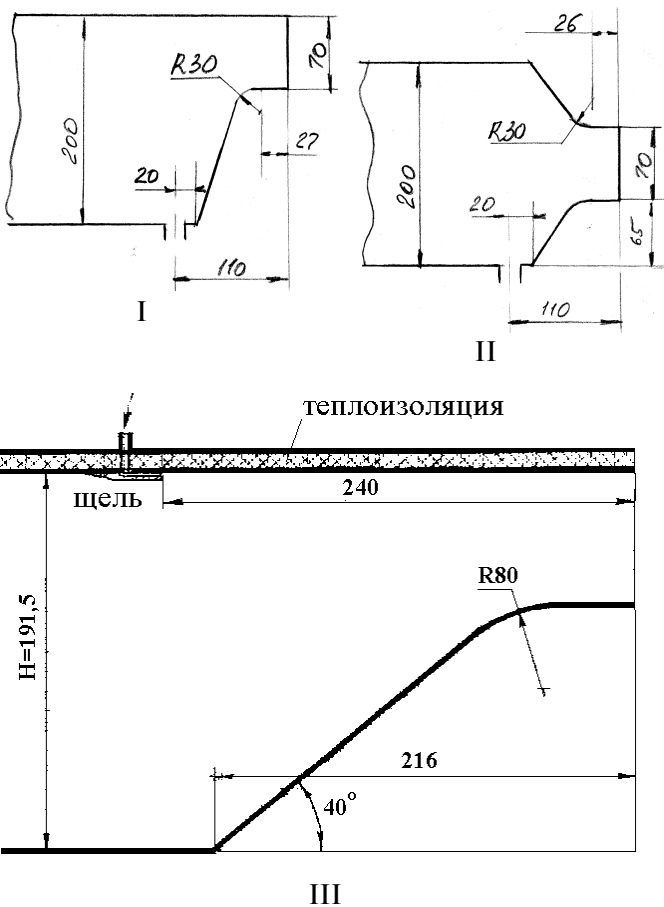


Рис. 1. Варианты модельных камер сгорания

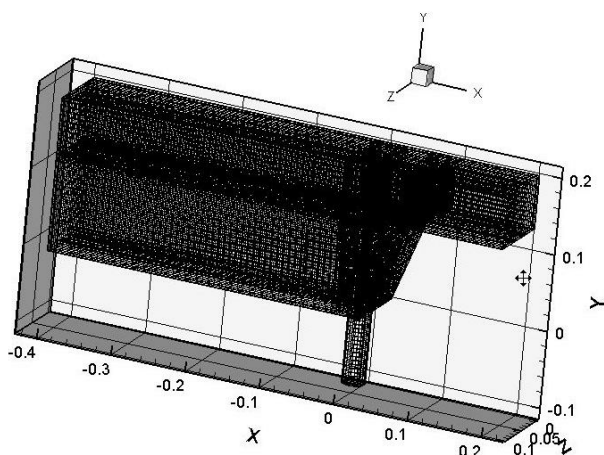


Рис. 2. Численная сетка для модельной камеры сгорания (вариант I)

4. Wikstrom P.M., Wallin S., Johansson A.V. Derivation and investigation of a new explicit algebraic model for the passive scalar flux. Phys. Fluids. 12:688-702. 2000.

5. INVENT Computing GmbH. FASTEST-3D-CFD-Code. Handbuch. Zweite Auflage, 1997.

6. Юн А.А., Крылов Б.И. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями, двухфазных течений в программном комплексе FASTEST-3D: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2007.

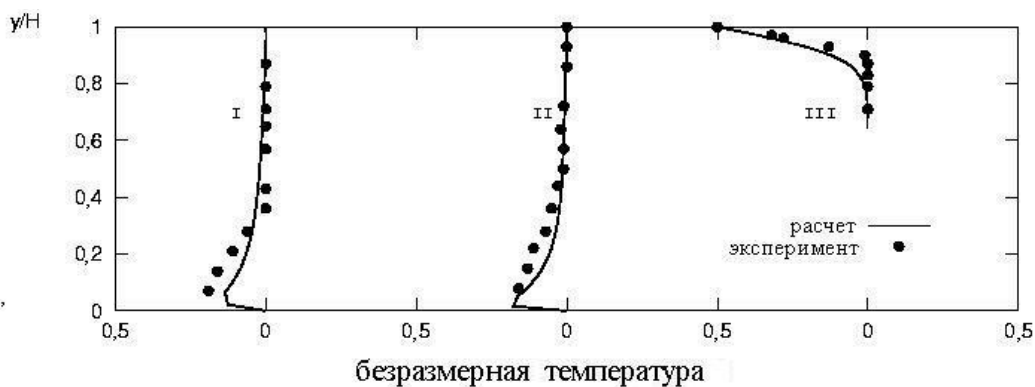


Рис. 3. Безразмерные профили температур: I — $\bar{x} = 0,55$; II — $\bar{x} = 0,55$; III — \bar{x} на выходе

Библиографический список

1. Johansson A. Engineering Turbulence Models and Their Development, With Emphasis on Explicit Algebraic Reynolds Stress Models. Stockholm, 2001.

2. Yun A., Sadiki A., Janicka J. A study of mixing and heat transfer in complex configuration using advanced RANS-based Models. TSFP4, Virginia, USA, 29 June 2005.

3. Крылов Б.И., Онищик И.И., Юн А.А. Расчет полей температур в модели смесительной камеры сгорания. Вестник Московского авиационного института. 2008. Т.15. №5.

7. Колосков А.С., Онищик И.И. О распределении температур в однородной системе поперечных струй // Сборник «Горение в потоке». Казань, 1982.

8. Крылов Б.А., Онищик И.И., Юн А.А. Расчетно-экспериментальное исследование течений в элементах камеры сгорания // 4-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2005». 10–13 окт. 2005 г.: Тезисы докл. М.: Изд-во МАИ, 2005.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 20.09.2008