

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-МАССООБМЕНА В МОДЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Александр Александрович Юн родился в 1974 г. в городе Бекабаде, Уз. 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.

Alexander A. Yun was born in 1974 in Bekabad city, Uzbekistan, principal engineer in NPO «Saturn». Dr. Dr. – Eng. The main research interest in gas turbine engine, combustion chamber and computational fluid dynamics. Author of 20 scientific papers.

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.

Boris A. Krilov was born in 1935 in Shuya city, Ivanovskaya province, leading researcher, researcher at the MAI. Ph. D. The area of interests is gas turbine engine, turbine and computational fluid dynamics. Author of 180 scientific papers.

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.

Ivan I. Onishik was born in 1934 in Brest, Belarus, professor at the MAI. Ph. D. The area of interest is gas turbine engine, combustion chamber and computational fluid dynamics. Author of 70 scientific papers.

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

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;
$\overline{G_c}$	- относительный расход холодного воздуха;
k	- кинетическая энергия турбулентности, м ² /с ² ;
P	- давление, Па;
P	- член генерации турбулентности в уравнении переноса реynольдсовых напряжений;
Re	- число Рейнольдса;
T	- температура, К;
T_c	- температура холодного воздуха, К;
T_h	- температура горячего воздуха, К;
$\overline{T_c} = T_c / T_h$	- безразмерная температура;
t	- время, с;
\overline{q}	- относительный скоростной напор;
u_i	- компоненты скорости, м/с;
$\overline{u_i u_j}$	- компоненты реynольдсовых напряжений, м ² /с ² ;
$\overline{u_j T}$	- турбулентный поток тепла, м·К/с;
x_i	- координаты, м;
$\overline{x} = x_i / D$	- относительное расстояние от начала канала до оси струи;
δ_{ij}	- символ Кронекера;
ε	- скорость диссипации кинетической энергии, м ² /с ² ;
φ	- величина пассивного скаляра
μ	- ламинарная динамическая вязкость, кг/(м·с);
μ_t	- турбулентная динамическая вязкость, кг/(м·с);
ρ	- плотность, кг/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 смешения 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 (EARSM) [1]. Явная алгебраическая модель рейнольдсовых напряжений позволяет обойти некоторые недостатки ряда популярных в промышленности моделей, базирующихся на гипотезе Буссинеска ($k-\varepsilon$ или $\kappa-\omega$ 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 гексаэдромными 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 EARSM (Wallin&Johansson) [1], записываемая в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 a = & \beta_1 S + \beta_2 \left(S^2 - \frac{1}{3} II_s I \right) + \beta_3 \left(\Omega^2 - \frac{1}{3} II_{\Omega} I \right) + \beta_4 (S\Omega - \Omega S) \\
 & + \beta_5 (S^2 \Omega - \Omega S^2) + \beta_6 \left(S\Omega^2 - \Omega^2 S - \frac{2}{3} III \right) + \beta_7 \left(S^2 \Omega^2 + \Omega^2 S^2 - \frac{2}{3} IV \right) \\
 & + \beta_8 (S\Omega S^2 - S^2 \Omega S^2) + \beta_9 (\Omega S \Omega^2 - \Omega^2 S \Omega) + \beta_{10} (\Omega S^2 \Omega^2 - \Omega^2 S^2 \Omega),
 \end{aligned}$$

где $a = a_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}$ - тензор анизотропии рейнольдсовых

напряжении; $S = S_{ij} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$ - тензор скоростей деформации, нормированный к

временному масштабу турбулентности τ ; $\Omega = \Omega_{ij} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$ - тензор вектора

завихренности, нормированный к турбулентному масштабу времени τ ; I - единичная матрица; β_i - неизвестные коэффициенты; $II_s, II_\Omega, III, IV, V$ - 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]:

$$-\rho \overline{u_i \varphi} = -(1 - c_{\varphi 4}) B_{ij} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial x_k},$$

где матрица B находится 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: $c_s = 1 - c_{\varphi 2} - c_{\varphi 3}$, $c_\Omega = 1 - c_{\varphi 2} + c_{\varphi 3}$; параметр

$G = \frac{1}{2} \left(2c_{\varphi 1} - 1 - \frac{1}{r} - \frac{P}{\varepsilon} \right)$; параметр $r = \frac{k_\phi / \varepsilon_\phi}{k / \varepsilon} \approx 0.55$, параметры, получаемые из инвариантов

$Q_1 = c_s^2 II_s + c_\Omega^2 II_\Omega$, $Q_2 = \frac{2}{3} c_s^3 III_s + 2c_s c_\Omega^2 IV$; модельные константы имеют следующие значения:

$c_{\varphi 1} = 4,51; c_{\varphi 2} = -0,47; c_{\varphi 3} = 0,02; c_{\varphi 4} = 0,08$.

Для определения временного масштаба турбулентности решаются уравнения для кинетической энергии и диссипации, приведенные в работе [6].

Модельные коэффициенты приведены в табл. 1.

Модельные коэффициенты

Таблица 1

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 для исследования 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, 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 $Re = (0,7...1,9) \cdot 10^5$.

Рассматривались три варианта модельных устройств камеры сгорания: с отверстием и сужающимся снизу-вверх выходным устройством; с отверстием и сужающейся с двух сторон конфузурной 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 составлял 30 мм, а высота щели 2 мм. Геометрические параметры рассматриваемых модельных камер приведены на рис. 1. Степень конфузурности (отношение высот канала на входе и на выходе) $\bar{H}_{out} = 0,35$.

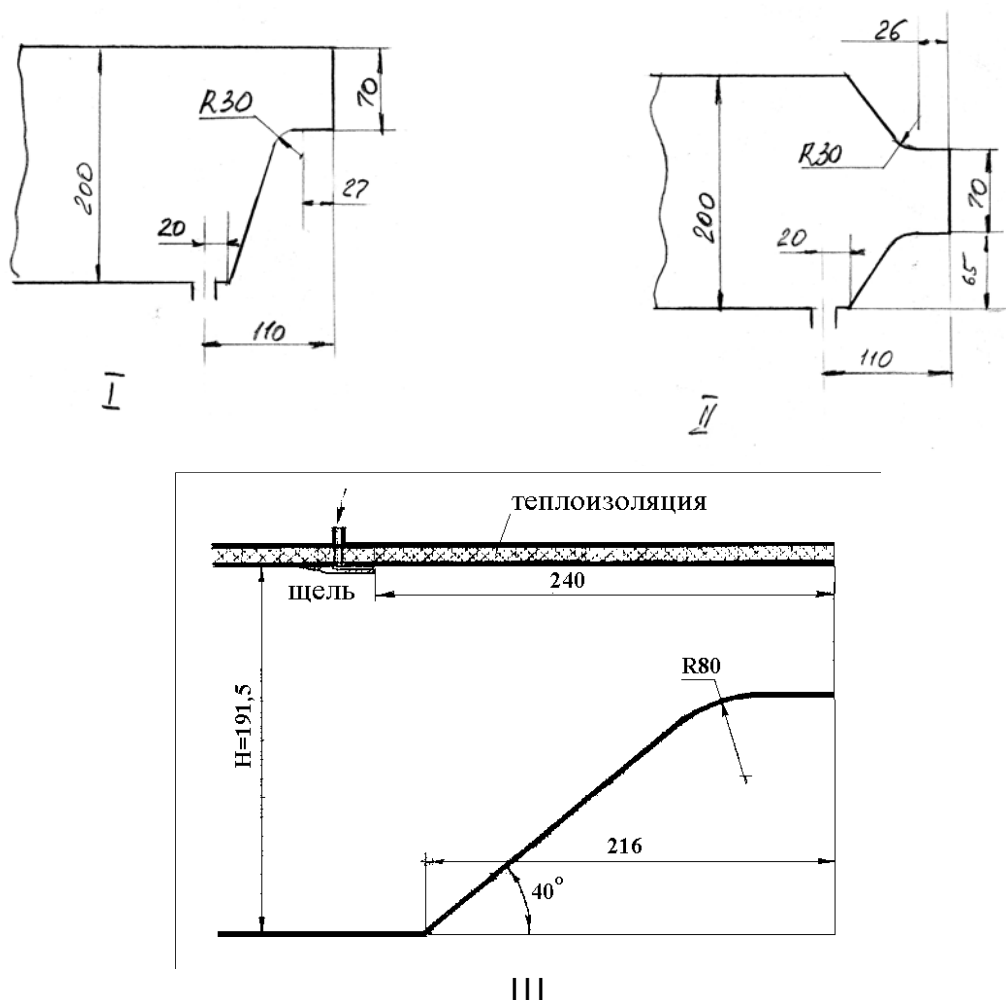


Рис. 1. Варианты модельных камер сгорания

Газодинамические параметры сведены в табл. 2.

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

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

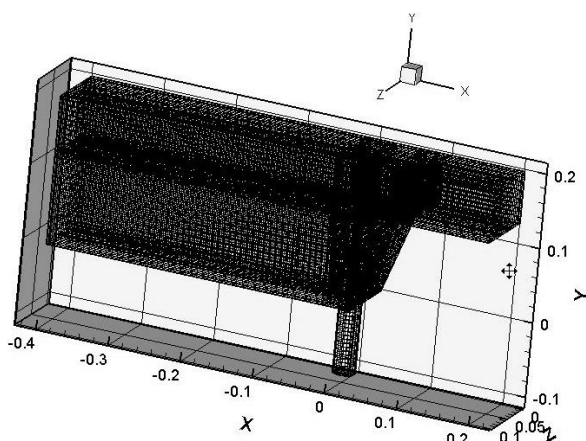


Рис. 2. Численная сетка для модельной камеры сгорания (вариант I)

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.

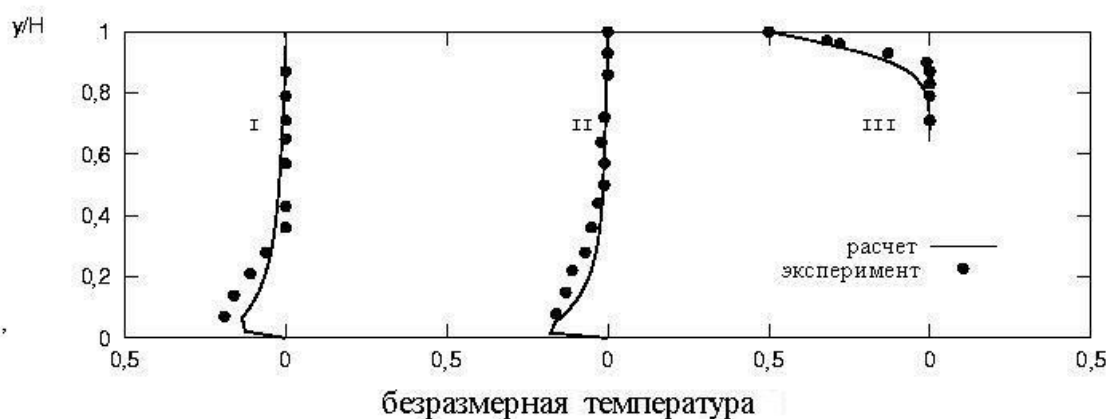


Рис. 3. Безразмерные профили температур: I - $\bar{x} = 0,55$; II - $\bar{x} = 0,55$; III - \bar{x} на выходе

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, которое, вероятно, возможно избежать, используя Low-Re модели.

Summary

The presented model predicts satisfied results for temperature profile in all cases. There is a small difference between simulations and experimental data that could be improved through using special Low Reynolds models.

Список литературы

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. Юн А. А., Крылов Б. И., Онищик И. И. Расчет полей температур в модели смесительной камеры сгорания. Вестник Московского авиационного института. 2008, т.15, №5.
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.
7. Колосков А. С., Онищик И. И. *О распределении температур в однорядной системе поперечных струй*. Сборник «Горение в потоке». Казань, 1982.
8. Юн А.А., Крылов Б.А., Онищик И.И. Расчетно-экспериментальное исследование течений в элементах камеры сгорания. Сб. тезисов научной конференции «Авиация и космонавтика-2005». Москва, 2005.

Ключевые слова

EARSM, EASFM, сужающийся канал, тепло-массообмен, рейнольдсовы напряжения, адиабатные граничные условия, эксперимент, охлаждение через щель и отверстия.