

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В МОДЕЛИ СМЕСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ 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 приведены результаты 3-х мерного моделирования течений в камере сгорания с использованием явной алгебраической модели рейнольдсовых напряжений. Представлено сопоставление расчетных данных с экспериментальными.

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 ;
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

Расчетные методы для описания турбулентных течений в различных технических устройствах достигли большого совершенства и продолжают развиваться в настоящее время. Создаваемые на их базе комплексы программ для ЭВМ становятся мощным инструментом конструкторов. В связи со сложностью закономерностей турбулентных течений и условий их

реализации, дальнейшее развитие расчетных методов возможно на базе сопоставления их с экспериментальными данными. В особенности это относится к течениям в камерах сгорания, где рабочий процесс базируется на взаимодействии закрученных потоков с поперечными и спутными струями в сочетании с процессом подготовки и горения смеси топлива с воздухом.

Представляется целесообразным поэтапный анализ наиболее характерных течений, таких, как распространение поперечных струй, закрученных потоков, пристеночных струй в каналах различной формы. Отдельным задачам подобного типа посвящена данная работа.

Моделирование турбулентных течений выполнялось на базе осредненных уравнений Навье-Стокса с использованием явной алгебраической модели 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 $k - \omega$ модели), при сопоставимой скорости вычислений [2, 3]. Для моделирования использовался программный комплекс Fastest-3D [4], разработанный 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 использованы осредненные уравнения сохранения массы, импульса, энергии и уравнение состояния, соответственно:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j},$$

$$\rho c_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \rho c_p \frac{\partial \bar{u}_i T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' T} \right),$$

$$p = \rho R T.$$

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

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

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

$S = S_{ij} = \frac{\tau}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$ - 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 τ ; I - единичная матрица; β_i - неизвестные коэффициенты;

$$II_s = S^2 = S_{ij} S_{ij},$$

$$II_\Omega = \Omega^2 = \Omega_{ij} \Omega_{ji},$$

$$III = S^3 = S_{ij} S_{jk} S_{ki},$$

$$IV = S\Omega^2 = S_{ij} \Omega_{jk} \Omega_{ki},$$

$$V = S^2 \Omega^2 = S_{ij} S_{jk} \Omega_{kj} \Omega_{jk} - \text{инварианты тензоров.}$$

Неизвестные коэффициенты β_i находятся из упрощенного алгебраического уравнения переноса рейнольдсовых напряжений, приведенного ниже [2]:

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

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

Для замыкания уравнения энергии использовалось предположение о пропорциональности потока скаляра $\overline{u_j T}$ градиенту температуры T [3]:

$$-\rho \overline{u_j T} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j}.$$

Для определения временного масштаба турбулентности решаются уравнения для кинетической энергии и диссипации [3]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right].$$

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

На рис. 1 представлены вторичные линии течения, полученные для полностью развитого турбулентного течения в канале квадратного сечения для числа $Re = 250000$ с помощью широко применяемой в промышленности $k - \varepsilon$ моделью и EARSM.

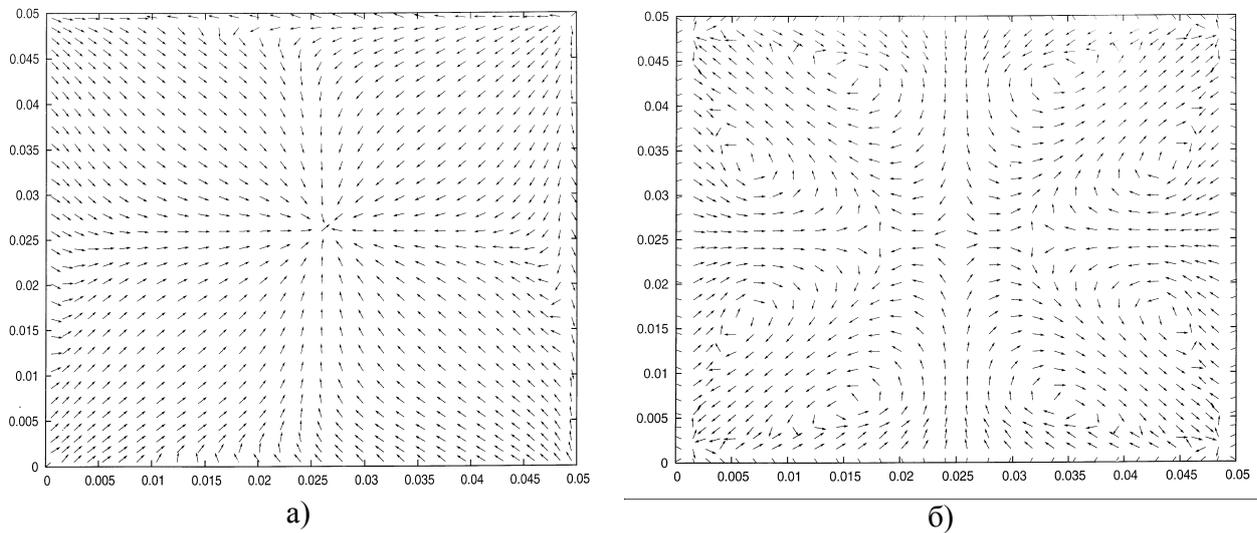


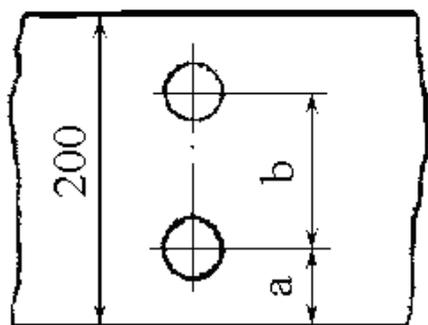
Рис. 1. Вторичные линии течения в квадратном канале:
а - стандартная $k - \varepsilon$ модель; б - EARSM

Модель $k - \varepsilon$, базирующаяся на градиентном замыкании осредненных уравнений Рейнольдса, показывает изотропное поле вторичных линий. EARSM демонстрирует физически правильное поле вторичных линий (8 рециркуляционных зон), аналогично наблюдаемое в

экспериментах [5]. Вследствие этого для моделирования выходного устройства камеры сгорания использовалась модель EARSМ.

Экспериментальная модель представляла собой канал квадратного сечения (200×200 мм), по которому подавались продукты сгорания керосина в воздухе с температурой T_h . В нижней стенке канала располагались втулки с отверстиями, через которые подавался воздух с температурой T_c . Вниз по потоку на различных расстояниях от отверстий 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 выходных устройств камеры сгорания: с одним, двумя, тремя отверстиями [6, 7]. Расположение отверстий приведены на рис. 2. Диаметр отверстий составлял 21 мм.



количество отверстий	b	a
1	0	100
2	100	50
3	67	33

Рис. 2. Варианты модельных выходных устройств камеры сгорания

Газодинамические параметры сведены в табл. 2.

Газодинамические параметры

Таблица 2

Кол-во отверстий	\bar{q}	\bar{T}_c	\bar{G}_c
1	1,71	0,563	0,022
2	1,71	0,557	0,035
3	1,97	0,565	0,054

На рис. 3 показана численная сетка для варианта с двумя отверстиями. Количество

контрольных объемов 190000, 230000 и 270000 для вариантов с одним, двумя и тремя отверстиями соответственно. На стенках модельного выходного устройства заданы адиабатные условия.

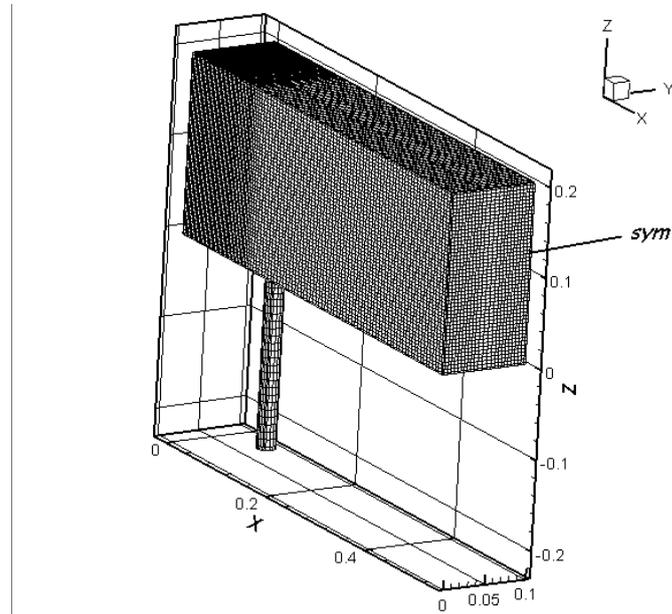


Рис. 3. Численная сетка для выходного устройства с двумя отверстиями (sym – плоскость симметрии)

На рис. 4 показано векторное поле скоростей для варианта с одним отверстием на оси симметрии, полученное при моделировании.

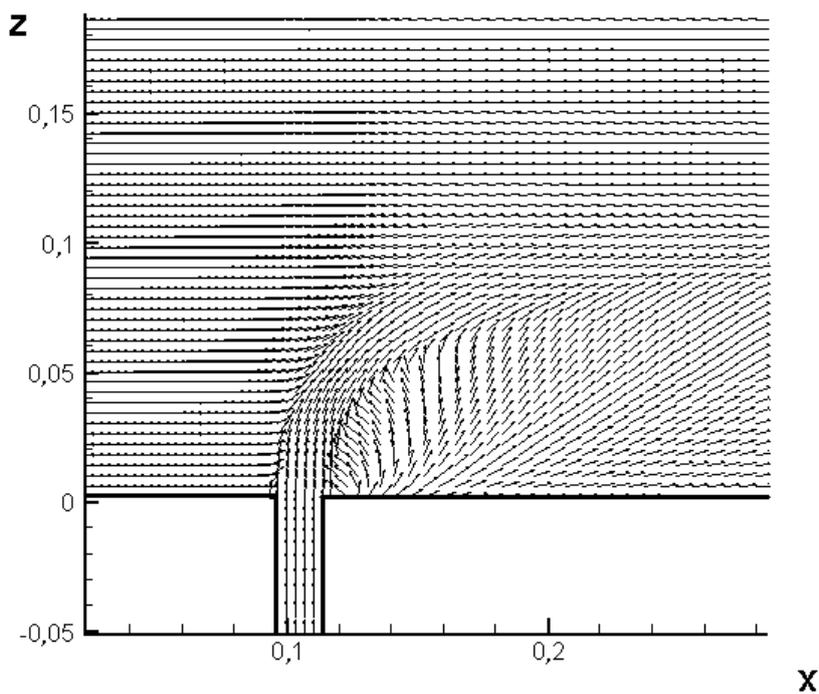


Рис. 4. Векторное поле скоростей для варианта с одним отверстием

На рис. 5 показано сравнение безразмерных профилей осредненных по ширине канала температур $\Theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$, полученных экспериментально и расчетным методом для разных вариантов (рис. 2, табл. 2) на расстояниях \bar{x} от оси струи (номера вариантов соответствует числу отверстий).

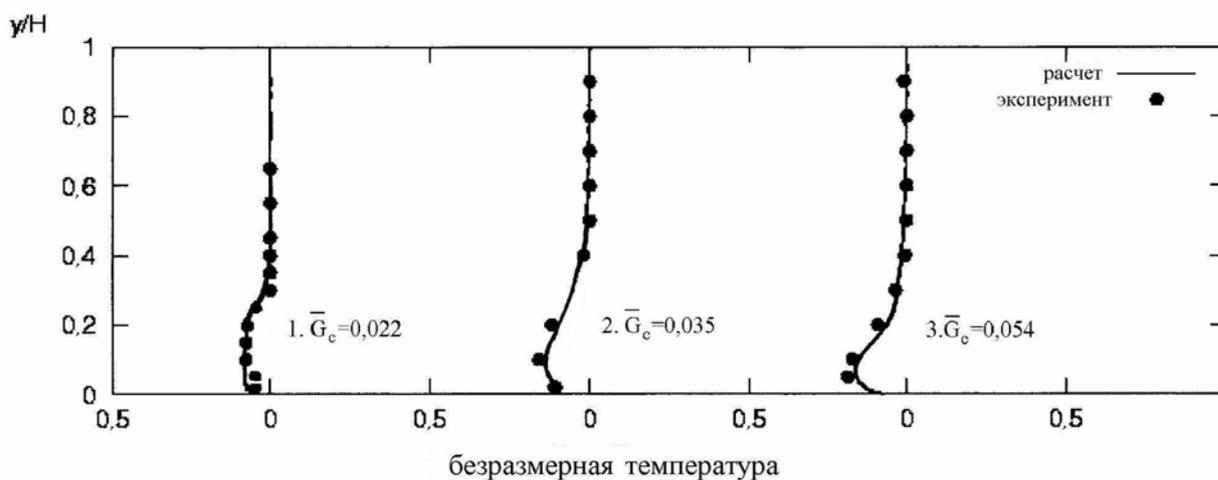


Рис. 5. Безразмерные профили температур: 1- $\bar{x} = 0,55$; 2- $\bar{x} = 0,55$; 3- $\bar{x} = 1,4$

Выводы

Используемая в этой работе модель удовлетворительно предсказывает температурный профиль во всех трех случаях при $\overline{G_c} = 0,022$; $\overline{G_c} = 0,035$ и $\overline{G_c} = 0,054$. Является целесообразным принятие адиабатных условий на стенке при анализе радиальной эпюры температур на выходе камеры сгорания.

Summary

The presented in this paper turbulent and heat transfer model predicts satisfied results for temperature profile in all cases. The adiabatic assumption on the wall is correct in case of interests in area far from the wall (it requires by analysis of radial profile of temperature by outlet of combustion chamber).

Ключевые слова

EARSM, 3-х мерное моделирование, рейнольдсовыe напряжения, пристеночные течения, адиабатные граничные условия, эксперимент.

Список литературы

1. Johansson A. *Engineering Turbulence Models and Their Development, With Emphasis on Explicit Algebraic Reynolds Stress Models*. Stockholm, 2001.
2. Yun A. *Development and analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for complex Engineering Configurations*. Doctoral Thesis, Darmstadt, Germany, 2005.
3. 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.
4. INVENT Computing GmbH. FASTEST-3D-CFD-Code. Handbuch. Zweite Auflage, 1997.
5. Колосков А. С., Онищик И. И. О распределении температур в однорядной системе поперечных струй. Сборник «Горение в потоке». Казань, 1982.
6. Юн А.А., Крылов Б.А., Онищик И.И. Исследование системы поперечных и спутных струй в модельных камерах сгорания. Сб. тезисов научной конференции «Авиация и космонавтика-2006». Москва, 2006.
7. 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.