

УДК 621.4

Б. А. Крылов, А. А. Мануйлов, С. А. Федоров, А. А. Юн

**Основные принципы выбора моделей турбулентности, используемых при расчете полей скоростей и температурного состояния системы охлаждения стенок жаровой трубы ОКС ГТД**

Крылов Борис Анатольевич, ведущий научный сотрудник, докторант МАИ.

Кандидат технических наук.

Мануйлов Андрей Александрович, инженер-конструктор НТЦ им. А. Люльки

ОАО «НПО «Сатурн». т. +7 985 143-63-54, e-mail: manuyloff@rambler.ru.

Федоров Сергей Андреевич, нач. отдела КО КС, ФК и РС НТЦ им. А. Люльки

ОАО «НПО «Сатурн».

Юн Александр Александрович, ведущий конструктор НТЦ им. А. Люльки ОАО

«НПО «Сатурн». Кандидат технических наук.

*В представленной работе проведен анализ моделей турбулентности и результаты расчетов процессов теплообмена у охлаждаемой поверхности стенки жаровой трубы ОКС ГТД.*

*Расчет проведен в коммерческом пакете ANSYS CFX 10.0. Использовались и анализировались следующие модели турбулентности:  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , SST,  $\omega$ -RSM.*

*Ключевые слова: двухстенная схема охлаждения, модель турбулентности, вычислительная гидрогазодинамика, численные методы.*

#### Условные обозначения

- $A_i, c_i$  - модельные константы;
- $c_p$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
- $k$  - кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;
- $p$  - давление, Па;
- $Re$  - число Рейнольдса;
- $T$  - температура, К;
- $t$  - время, с;
- $u_i$  - компоненты скорости, м/с;
- $\overline{u_i u_j}$  - компоненты рейнольдсовых напряжений, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;
- $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;
- $\varepsilon$  - скорость диссипации кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;
- $\varphi$  - величина пассивного скаляра
- $\mu$  - ламинарная динамическая вязкость, кг/(м·с);
- $\mu_t$  - турбулентная динамическая вязкость, кг/(м·с);
- $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;
- $\tau$  - временной масштаб турбулентности, с;
- $\overline{(\bullet)}$  - осредненные или нормированные величины.

В течение длительного времени работы по проектированию камер сгорания носили преимущественно эмпирический характер, с использованием качественных

физических представлений и критериальных уравнений, инженерных методов расчета. Для дальнейшего совершенствования процесса проектирования необходим переход в исследованиях и конструкторских разработках с эмпирического на детальный физический уровень. Сегодня научная основа для такого перехода сформировалась в ходе быстрого развития вычислительной гидродинамики и появления быстродействующих ЭВМ. Появилось множество коммерческих и научных пакетов программ, направленных на решение данных задач. Однако используемые математические модели не являются универсальными, научные работы по ним продолжаются. Важный вопрос численных исследований – это выбор рациональной системы численного решения.

## **1. Численные модели**

При прямом численном моделировании (DNS) предполагается решение полных нестационарных уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности. Это означает, что не требуется дополнительного моделирования и происходит учет всех эффектов, присущих течению. Трудности DNS заключаются в ограниченности компьютерных ресурсов в связи с требуемыми разрешением по сетке и временным шагам. Более перспективным методом в ближайшем будущем является метод моделирования крупных вихрей (LES), предполагающим прямой расчет крупных вихрей и моделирование мелких [1].

В настоящее время в промышленных расчетах доминирующие положения занимают турбулентные модели, базирующиеся на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса, записываемых в следующем виде [2]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} + g_i. \quad (2)$$

Уравнение переноса скаляра:

$$\rho \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} - \rho \overline{\phi' u_j'} \right) + \bar{S}. \quad (3)$$

Основной проблемой в ходе решения является незамкнутость системы уравнений вследствие появления новых неизвестных – рейнольдсовых напряжений и потока скаляра. Замыкание системы уравнений может основываться на предположении Буссинеска, связывающее рейнольдсовые напряжения со скоростью средней деформации через турбулентную вязкость. Для замыкания уравнения переноса скаляра используется предположение о пропорциональности потока скаляра градиенту осредненного скаляра.

В работе использовались модели с двумя дифференциальными уравнениями, а также модель  $\omega$ -RSM, базирующаяся на решении транспортных уравнений для переноса рейнольдсовых напряжений.

Уравнения переноса, используемые в моделях с одним или двумя дифференциальными уравнениями, можно записать в следующем виде [3]:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = P - D + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \Gamma_\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + A. \quad (4)$$

Расшифровка членов в уравнении (4) сведены для каждого уравнения в табл. 1.

### Расшифровка членов в уравнениях переноса.

Табл. 1

	$\Phi$	P	D	$\Gamma_\Phi$
кинетическая энергия	$k$	$\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$	$\rho \varepsilon$ или $\beta^* \rho k \omega$	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$
скорость диссипации	$\varepsilon$	$c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$	$c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$	$\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$
удельная скорость диссипации	$\omega$	$\alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$	$\beta \rho \omega^2$	$\sigma_\omega \mu_t$

В случае  $k$ - $\varepsilon$  модели решаются уравнения для кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации  $\varepsilon$ .

Для  $k$ - $\omega$  модели в качестве второго уравнения используется удельная скорость диссипации  $\omega$ .

В SST модели используется суперпозиция  $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$  модели и посредством весовой функции  $F_1$  осуществляется переключение модели в зависимости от расстояния до стенки, параметр  $A$  находится по следующей формуле:

$$A = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (5)$$

в других моделях  $A=0$ .

Используемые константы для моделей с двумя дифференциальными уравнениями приведены в табл. 2.

Модельные коэффициенты для моделей с двумя дифференциальными уравнениями.

Табл. 2

$k$ - $\varepsilon$ [4]	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$c_\mu$
	1,44	1,92	1,0	1,3	0,09
$k$ - $\omega$ [2]	$\beta^*$	$\beta$	$\alpha$	$\sigma_k$	$\sigma_\omega$
	0,09	0,075	5/9	0,5	0,5
$k$ - $\omega$ (SST) [5]	$\beta_1^*$	$\beta_1$	$\alpha_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega 1}$
	0,09	0,075	$\beta_1 / \beta_1^* - \sigma_{\omega 1} k^2 / \sqrt{\beta_1^*}$	0,85	0,5
	$\beta_2^*$	$\beta_2$	$\alpha_2$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega 2}$
	0,09	0,0828	$\beta_2 / \beta_2^* - \sigma_{\omega 2} k^2 / \sqrt{\beta_2^*}$	1	0,856

Дополнительно к вышеприведенным моделям в работе использовалась более сложная модель, относящаяся к моделям второго уровня. Ниже дана так называемая  $\omega$  - модель Рейнольдсовых напряжений [6].

$$\rho \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial t} + u_k \rho \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\rho P_{ij} + \frac{2}{3} \beta' \rho \omega \delta_{ij} - \rho \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma^*} \right) \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} \right]. \quad (6)$$

Уравнение для переноса удельной скорости диссипации и модельные константы приводились выше. Решение уравнений переноса для компонент тензора рейнольдсовых напряжений позволяет учитывать большинство эффектов, присущих турбулентному течению, но имеет существенный недостаток, так как требует решения семи дополнительных дифференциальных уравнений, что сопряжено с повышенным требованием компьютерных ресурсов, а также проблем, связанных со сходимостью решения.

## 2. Описание конструкции

Схема охлаждения жаровой трубы представляет собой двухстенную конструкцию, состоящую из «холодной» и «горячей» стенок, которая показана на рис. 1. Охлаждающий воздух через перфорацию на «холодной» стенке подается в виде ударных струй на «горячую» стенку и эффективно ее охлаждает. Далее воздух поступает через отверстия в «горячей» стенке, расположенные под углом 30 градусов к потоку и, вытекая, образует защитную пелену, защищая «горячую» стенку. Отверстия на «холодной» и «горячей» стенках имеют шахматное расположение.

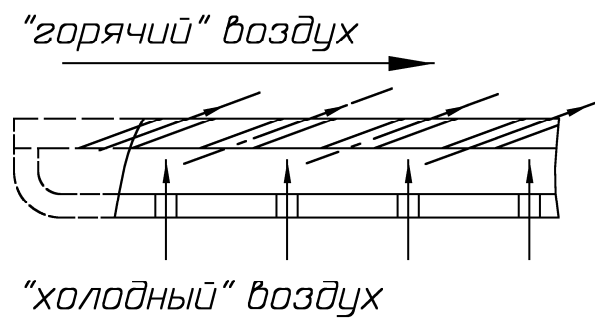


Рис. 1. Схема охлаждения сегмента жаровой трубы КС.

### 3. Математическая модель

Твердотельная математическая модель сегмента была построена с помощью программы Unigraphics NX. Построение расчетной сетки проводилось в программе ANSYS ICEM CFD.

Модель для расчета включала в себя область с 6 отверстиями, расположенных в 3 ряда (рис. 2).

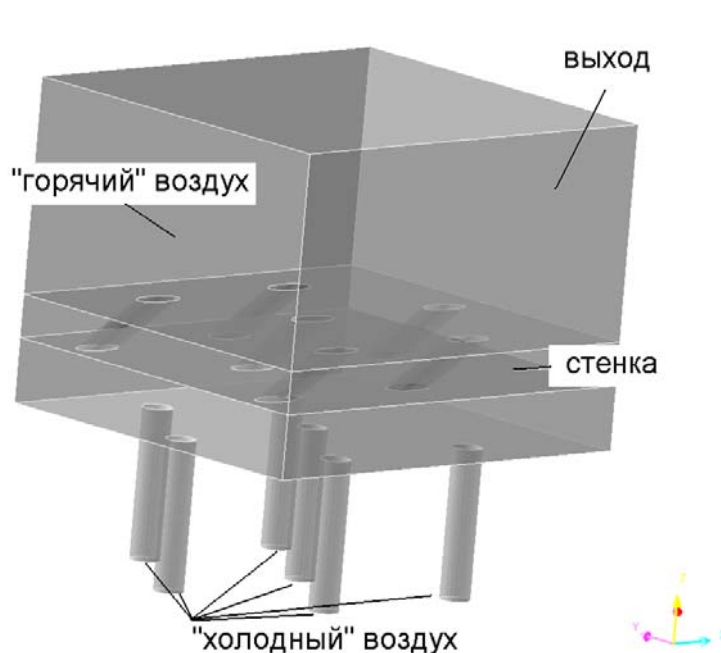


Рис. 2. Модель для расчета.

Построение и генерирование сетки выполнено вручную, с целью получения оптимальной численной сетки. Для данной геометрии использовалась структурированная многоблочная численная сетка. Для «грубой» сетки использовалась равномерная сетка с близлежащим к сетке узлом в логарифмическом слое, в случае «сгущенной к стенке» сетки близлежащий узел лежал в ламинарном подслое  $y^+=1$ , а следующие узлы были распределены по экспоненциальному закону. Количество контрольных объемов для «грубой» сетки составляло около 1 млн., для сгущенной к стенке около 1.5 млн. На боковых поверхностях расчетной области использовались периодические граничные условия, за исключением входной и выходной поверхностей.

В качестве начальных условий для скорости потоков использовались данные одномерного гидравлического расчета ОКС в самом горячем сечении и имели следующие значения: для холодного потока скорость во входных отверстиях 125 м/с и скорость горячего потока 52 м/с. Температура горячего потока выбрана максимальной и составляет 2235К, температура холодного потока 833К.

Вычисления проводились на двух ядрах рабочей станции с 4 Гб оперативной памяти с использованием коммерческого пакета CFX 10.0.

#### **4. Результаты расчетных исследований**

Исследовались вертикальные сечения, проходящие через центры отверстий, и поверхность сегмента.

При использовании  $k-\varepsilon$  модели, на «грубой» сетке проникновение холодных струй в горячий поток находится в пределах 3 мм от «горячей» стенки (рис. 3). Также наблюдается отсутствие ожидаемых зон обратных течений за струями, вследствие использования грубой сетки (рис. 4). Температура на стенке со стороны «горячего» потока (рис. 5) в зоне сформировавшегося турбулентного течения находится в диапазоне 980-2000К, что превышает ожидаемую температуру. Использование грубой сетки с узлами за пределами ламинарного подслоя у стенки дает неточные результаты оценки тепломассообмена в пристеночной области. С другой стороны такое моделирование возможно для получения интегральных характеристик тепломассообмена вдали от стенок.

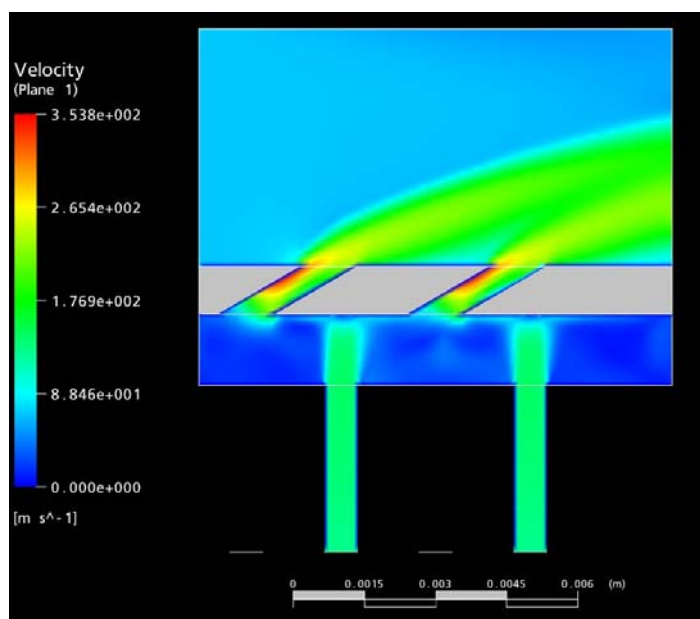


Рис. 3. Поле абсолютных скоростей в продольном направлении  
( «грубая» сетка,  $k-\varepsilon$  модель).

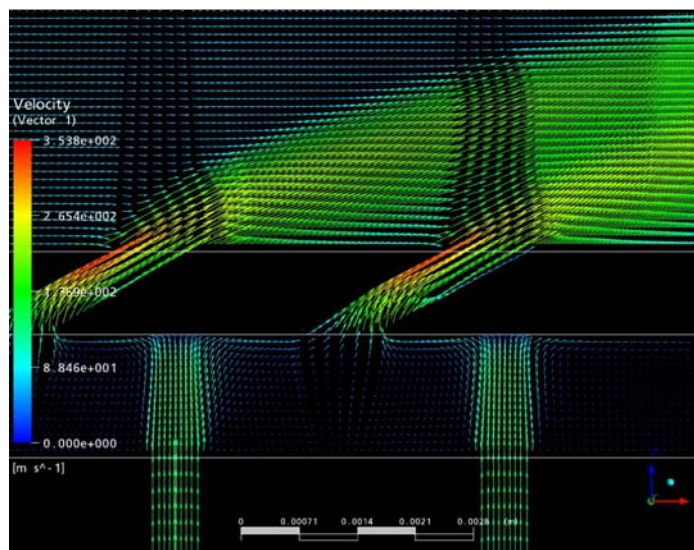


Рис. 4. Векторное поле скоростей в продольном направлении  
(«грубая» сетка,  $k-\varepsilon$  модель).

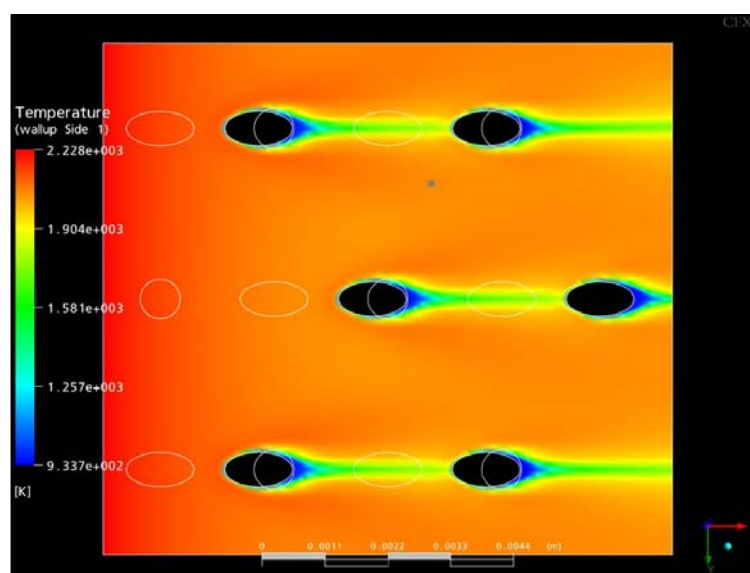


Рис. 5. Поле температур на «горячей» стенке (вид со стороны «горячего» газа,  
«грубая» сетка,  $k-\varepsilon$  модель).

Аналогичные, вышеприведенным, результаты получены и для  $k-\omega$  модели на «грубой» сетке (рис. 6).

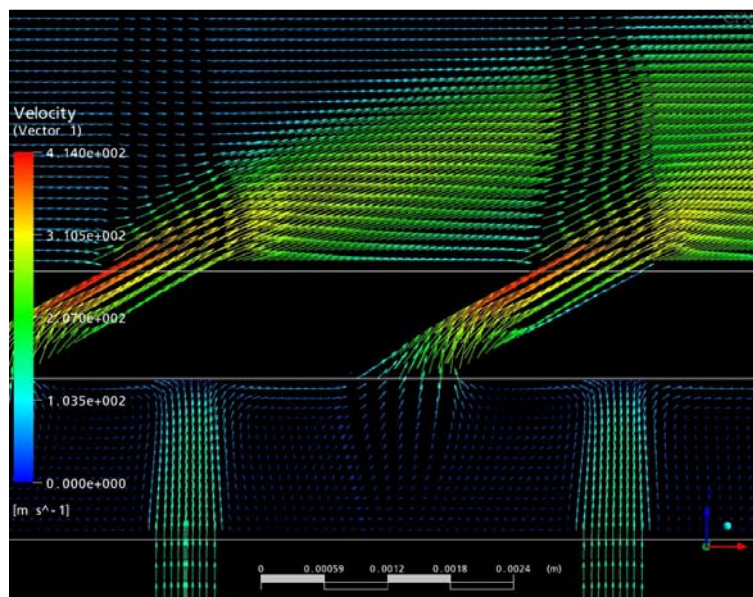


Рис. 6. Векторное поле скоростей в продольном направлении  
(«грубая» сетка,  $k-\omega$  модель).

Результаты расчетов, полученных с помощью  $k-\omega$  модели на «сгущенной к стенке» сетке показывают более слабое расхождение струй в продольном направлении (рис. 7). Проникание струй в «горячий» поток составляет 3,5 мм.

В отличие от предыдущих расчетов наблюдается образование рециркуляционных зон в области за струями (рис. 8). Максимальные температуры на «горячей» стенке находятся в диапазоне от 1350 до 1390К (рис. 9). Максимальные температуры наблюдаются в межструйных пространствах в поперечном направлении.

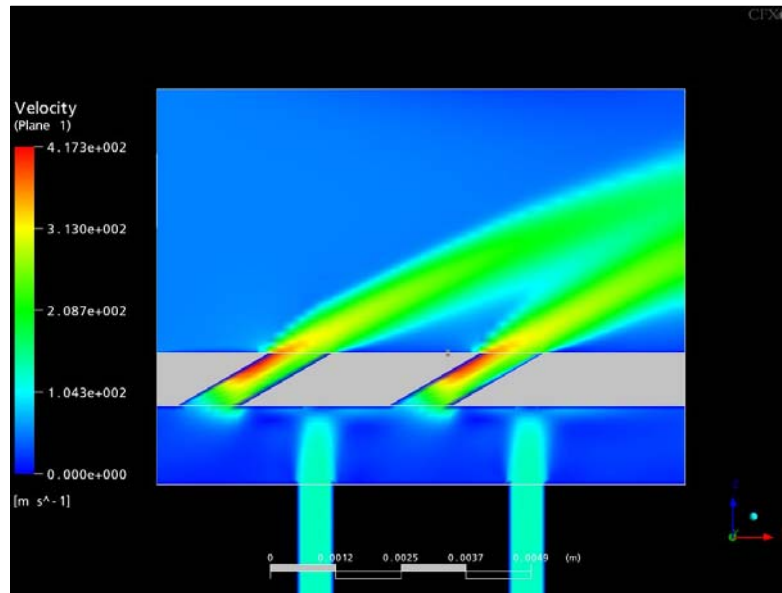


Рис. 7. Поле абсолютных скоростей в продольном направлении («сгущенная к стенке» сетка,  $k-\omega$  модель).

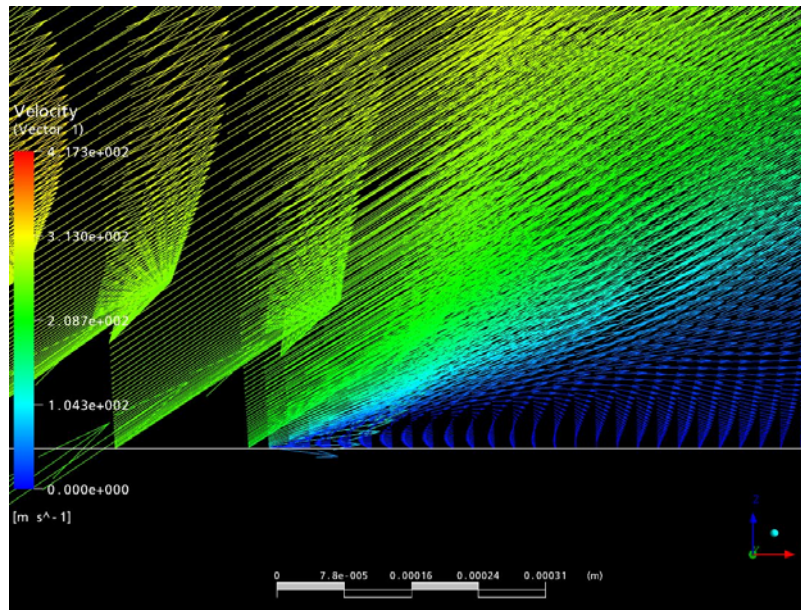


Рис. 8. Векторное поле скоростей в продольном направлении (увеличено, «сгущенная к стенке» сетка,  $k-\omega$  модель).

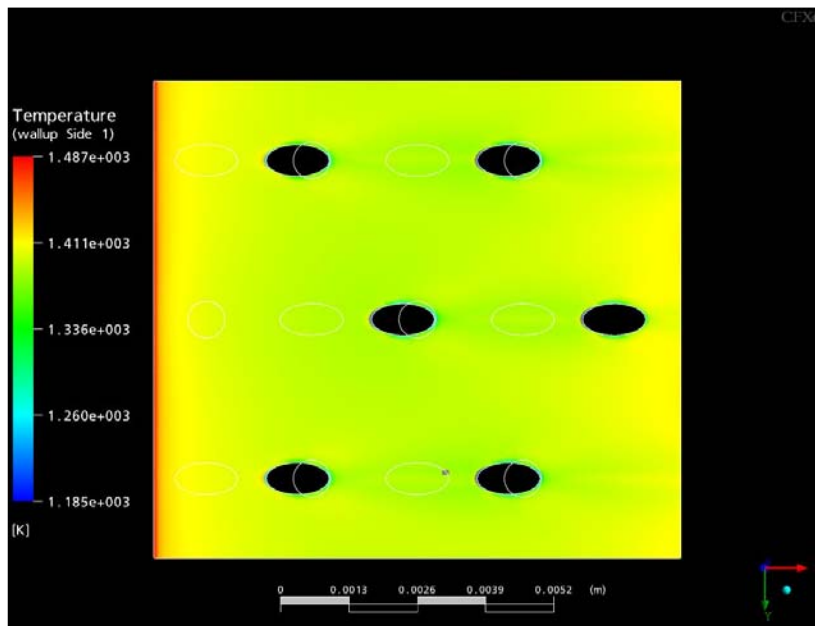


Рис. 9. Поле температур на «горячей» стенке («сгущенная к стенке» сетка,  $k-\omega$  модель).

Аналогичные результаты получены и для SST модели (Рисунки 10, 11), и для  $\omega$ -RSM модели.

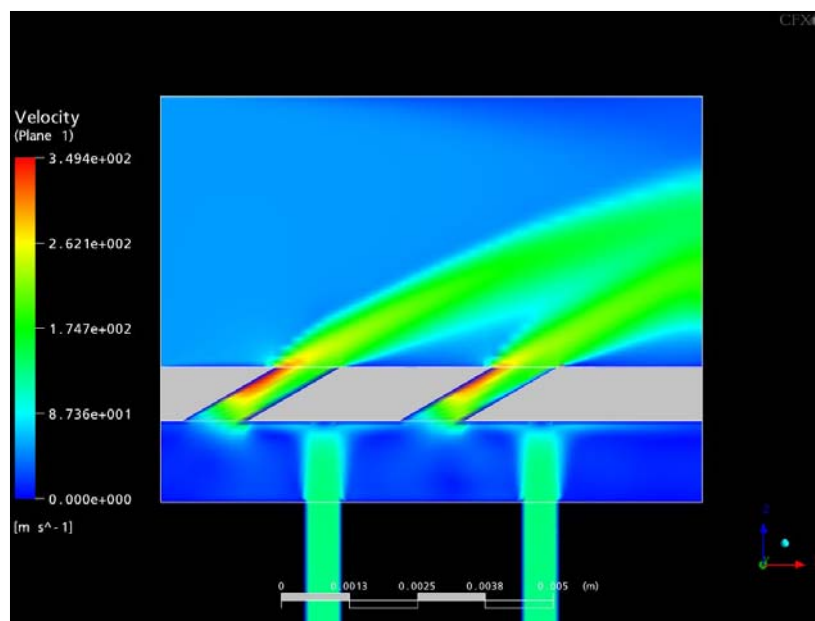


Рис. 10. Поле абсолютных скоростей в продольном направлении («сгущенная к стенке» сетка, SST модель).

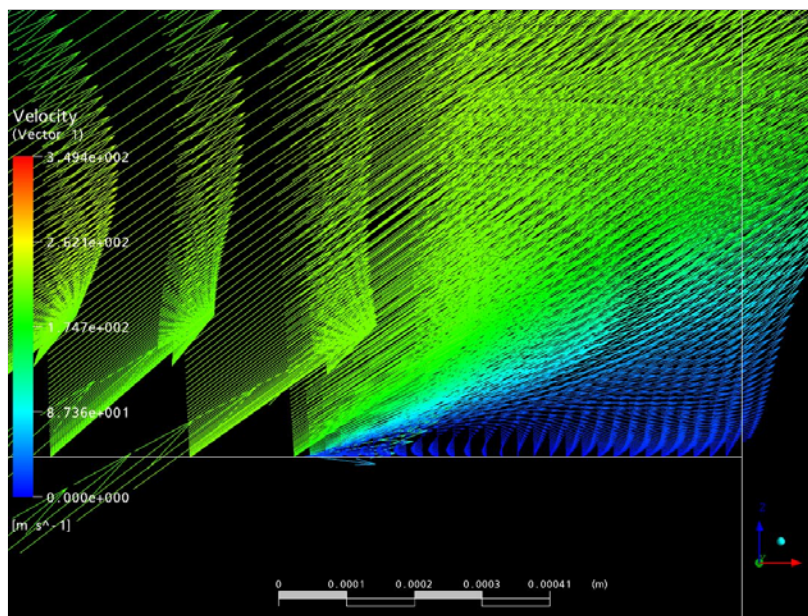


Рис. 11. Векторное поле скоростей в продольном направлении  
( «сгущенная к стенке» сетка, SST модель).

## Выводы

Для более точного описания процессов охлаждения стенки жаровой трубы ОКС ГТД в пристеночной зоне необходимо применять модели турбулентности, специально разработанные для пристеночных течений.

Для описания зон удаленных от стенки жаровой трубы камеры сгорания достаточно применения стандартной  $k-\varepsilon$  модели.

Для повышения точности расчета требуется применение численных сеток сгущенных к стенке.

## Список литературы

1. Юн А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.

2. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. California, 1994.
3. Yun A. Development and Analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for Complex Engineering Configurations. Doctor thesis. Darmstadt. 2005.
4. Jones W. P., Launder B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. Int. J. Heat Mass Transfer, 15:301-314, 1972
5. Menter F. R. Zonal two equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. A/AA 93-2906.
6. ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory.