

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТИВОТОЧНОГО ГОРЕЛОЧНОГО МОДУЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНИЗОТРОПНЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2011 Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, А. В. Бадерников

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева

Приведены результаты численного моделирования течения вязкого сжимаемого газа в противоточном горелочном модуле с учетом характерных особенностей течения в ограниченных стенками диафрагмированных закрученных потоках. Расчёты выполнены с использованием моделей турбулентности: SST, k- ϵ , RNG k- ϵ , EARSM, RSM BSL. Показано, что в случае применения модели переноса реинольдсовых напряжений RSM BSL (Reynolds Stress Model BaseLine) структура течения имеет особенности, не проявляющиеся при использовании стандартных двухпараметрических моделей турбулентности, но наблюдаемые при экспериментах.

Закрученное течение, вихревая горелка, анизотропная модель турбулентности.

Введение

Совершенствование процессов сгорания топлива в камерах сгорания ГТУ привело к созданию большого количества различных горелочных устройств, использующих закрутку потока. Интерес инженеров и исследователей к закрученным потокам не случаен – исследования течений с горением, типичных для камер сгорания ГТУ и различных горелочных устройств, показывают, что закрутка течения существенным образом сказывается на характеристиках поля течения: улучшении смешивания, повышении интенсивности горения в реагирующих потоках, способности струи к организации аэродинамической стабилизации [1]. Одним из перспективных вариантов конструкции является противоточный горелочный модуль, представленный на рис. 1.

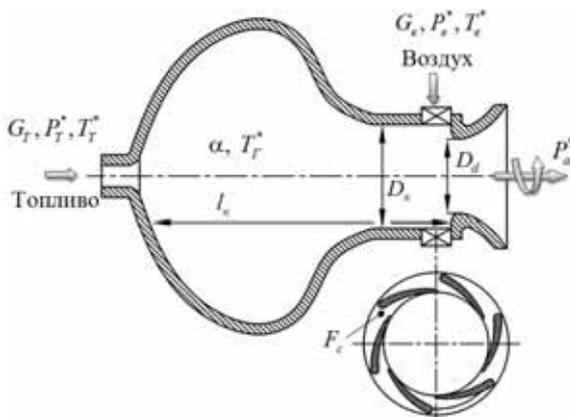


Рис. 1. Схема противоточного горелочного модуля

Общие подходы к проектированию подобных устройств, разработанные на основе балансных соотношений переноса энергии, вещества, импульса, позволяют определить интегральные параметры течения. Однако для совершенствования модуля необходимо знать распределение термогазодинамических параметров течения в объеме рассматриваемой конструкции. При этом экспериментальные исследования не всегда возможны, а также дорогостоящи и трудоёмки. Поэтому возникает необходимость численного моделирования закрученных потоков.

Численное описание турбулентных процессов - пока не полностью решённая задача. Моделирование турбулентного горения является ещё более сложной задачей. Одной из основных проблем представляется описание взаимосвязи турбулентных и химических процессов [2]. При этом результаты расчётов с использованием осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) чувствительны к выбору замыкающей полуэмпирической модели турбулентности [3]. Таким образом, правильное определение параметров потока, характеризующих турбулентность, является хорошей основой для дальнейшего моделирования химических реакций.

Геометрическая модель

В данной работе исследуется влияние различных моделей турбулентности на интегральные характеристики вихревого горелочного модуля (ВГМ) и на распределение параметров потока в нём.

Геометрическая модель рассматриваемого ВГМ представлена на рис. 2.



Рис. 2 Геометрическая модель ВГМ ($F_c=0.089$;
 $\bar{R}_d=0.533$; $L_k=5.73$)

Математическая модель

Рассматривалось турбулентное течение совершенного газа – воздуха.

Система уравнений Навье–Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, замыкалась моделями турбулентности SST, k-ε, k-ε RNG, k-ε EARSM, RSM BSL. Выбор моделей турбулентности для исследования был продиктован следующими соображениями: SST, k-ε и k-ε RNG основаны на предположении изотропности турбулентной вязкости, часто применяются в инженерной практике и рекомендуются разработчиками при решении задач с учётом горения [4]. Недостатком этих моделей является предположение об изотропности турбулентных параметров, которое не всегда может быть применено для закрученных течений [5].

В модели k-ε EARSM учёт анизотропности турбулентной вязкости достигается путём решения дополнительного алгебраического уравнения переноса для тензора анизотропии [2]. В ANSYS CFX представлены два варианта модели k-ε EARSM [6] и k-ω BSL EARSM [7]. Расчёты проводились для первого варианта, основанного на уравнениях k-ε, т.к. модель k-ω BSL EARSM разработана для расчётов в области аэродинамики.

Модель RSM BSL рекомендована разработчиками для расчёта сильно закрученных течений [8] и показала хорошо совпадающие с экспериментом результаты при расчёте течения закрученного потока в модельной камере сгорания [9]. В этой модели уравнение переноса решается для каждой из шести компонент тензора рейнольдсовых напряжений, что позволяет

учитывать большинство эффектов, присущих турбулентному течению [2]. Недостатками данной модели являются более медленная (по сравнению с k-ε) сходимость и повышенное требование к вычислительной мощности компьютера [8].

Необходимо отметить, что в пакете ANSYS CFX реализованы несколько вариантов модели RSM. Для проведения расчётов была выбрана модель RSM BSL (Reynolds Stress Model BaseLine), обладающая следующими особенностями:

- модель содержит уравнение переноса удельной скорости диссипации энергии ω ;
- по существу является двухслойной, где вблизи стенки используется набор констант для модели, включающей в себя ω , а в основном потоке – набор констант модели, основанной на ϵ и переформулированной в терминах ω ;
- сшивка ω и ϵ областей осуществляется подобно модели Ментера k- ω BSL [10];
- член перераспределения давления (pressure-strain correlation) отличается от используемого в модели RSM-LRR (Launder, Reece, Rodi) [11]. К сожалению, в документации не приведена ссылка на литературу для данной модели.

Расчётная модель

Для проведения расчётов на основании геометрической модели ВГМ была построена расчётная модель, представленная на рис. 3. Для снижения объёма сеточной модели, рассматривался сектор 120° , на границах которого устанавливались условия периодичности.

Сеточная модель представляет собой гексаэдральную многоблочную структурированную сетку. Блоки соединяются между собой граничным условием типа «интерфейс» – рис. 4.

Общий объём сеточной модели ~2.5 млн элементов. Размерность сетки в центральной области ВГМ (рис. 5, выделено красным) составляет $472 \times 62 \times 60$ узлов в осевом, радиальном и окружном направлениях соответственно.

Граничные условия

Для всех моделей турбулентности расчёты проводились в стационарной постановке при одинаковых граничных условиях: $\pi^*=1,03$; $1,05$; $1,1$; $1,2$. $T_{вх}^*=300$ К. Параметры турбулентности на входе вычислялись ANSYS CFX и соответствовали 5% интенсивности турбулентных пульсаций.

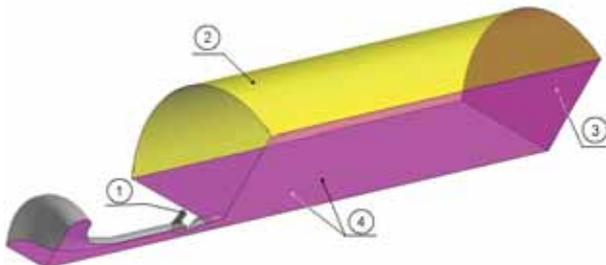


Рис. 3. Расчётная модель и граничные условия: 1 – вход; 2 – стенка со свободным скольжением; 3 – выход; 4 – периодичность

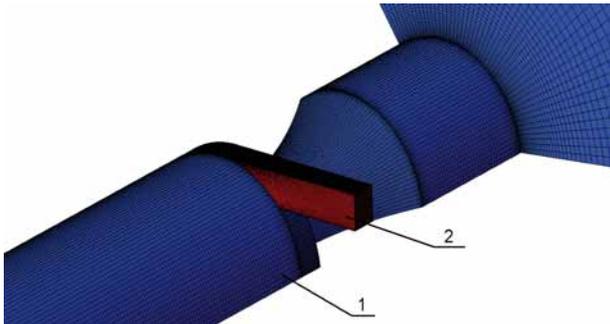


Рис. 4. Расположение блоков сетки: 1 – основной блок, 2 – сопловой ввод

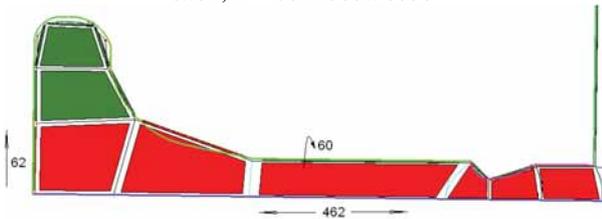


Рис. 5. Размерность сетки в центральной области ВГМ

Интегральные характеристики горелочного модуля

Результаты расчётов показали, что интегральные характеристики горелочного модуля слабо зависят от выбранной модели турбулентности – наибольшее отклонение массового расхода от средней величины отмечено для модели EARSM (+12%) и k-ε (-7%). Для остальных моделей турбулентности это отклонение не превышает 4.5% – рис. 6. При отсутствии экспериментальных данных по внутренней структуре течения это создаёт определённые трудности при анализе пригодности той или иной модели турбулентности для моделирования течения в горелочных модулях подобной конструкции.

Таким образом, актуальной задачей является экспериментальное исследование

структуры течения в вихревых горелочных модулях с противотоком.

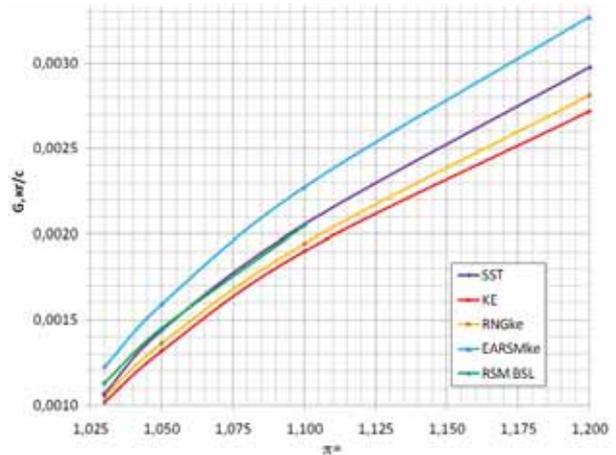


Рис. 6. Интегральные характеристики ВГМ для различных моделей турбулентности

Структура течения в горелочном модуле

Анализ структуры течения (рис. 7) показал: для моделей SST, k-ε, k-ε RNG, k-ε EARSM картина течения практически совпадает – закрученный периферийный поток отрывается от стенок в расширяющейся части вихревой трубы – камере смешения. При этом образуется система из двух тороидальных вихрей, один из которых является замкнутым, а во втором закрученный периферийный поток разворачивается на 180° с формированием приосевого вихря.

Структура течения, полученная с помощью модели RSM BSL (рис. 8), отличается от других рассмотренных вариантов – при движении периферийного потока в объёме горелочного модуля, в цилиндрической части образуется винтообразный тороидальный вихрь – 1, наблюдаемый в экспериментах [12], но который не показали другие модели. Как и для других моделей, поток отрывается от стенок в расширяющейся части вихревой трубы, но структура течения в камере смешения различается – вместо плавного разворота на 180° в центральной части камеры смешения образуются несколько тороидальных вихрей – 2 (рис. 8), которые выполняют роль жидких стенок. При этом ограниченный тороидальными вихрями закрученный поток движется сначала в сторону большего радиуса и, развернувшись на 180° вокруг тороидального вихря в верхней части камеры смешения, движется к оси горелочного модуля в узком пространстве между стенкой и вихрем. Радиальная компонента ско-

рости при этом возрастает с -1 м/с до -9 м/с , а угловая скорость вращения увеличивается с $\sim 100\text{ с}^{-1}$ до $\sim 7500\text{ с}^{-1}$, что в $\sim 2 \dots 2,5$ раза превосходит начальную угловую скорость в сопловом вводе. Высокая степень

закрутки потока приводит к эжекции воздуха из атмосферы ($\sim 4\%$ от G_B), что не было отмечено для других моделей, но наблюдалось при экспериментах [12].

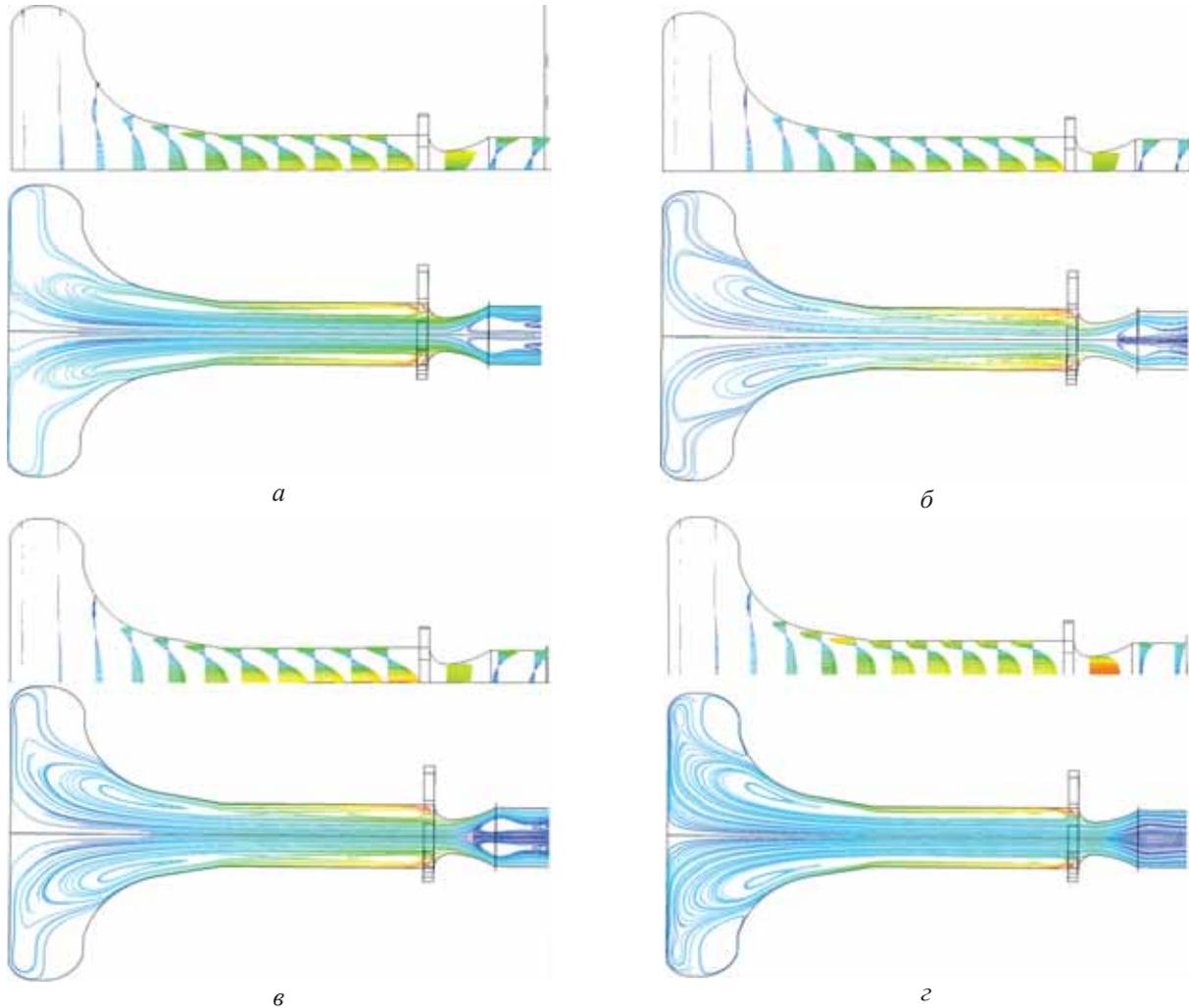


Рис. 7. Векторы осевой скорости и структура течения: (а) SST; (б) $k-\varepsilon$; (в) $k-\varepsilon$ RNG; (z) $k-\varepsilon$ EARSМ

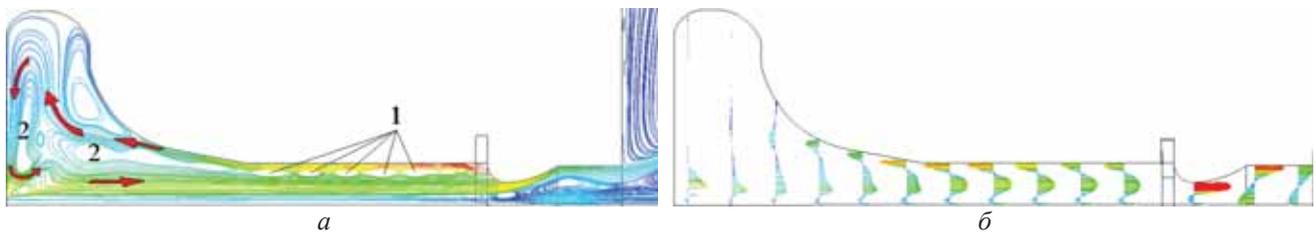


Рис. 8. Модель RSM BSL. Структура течения (а) и векторы осевой скорости (б)

Распределение параметров потока по объёму ВГМ

Рассмотрим распределение параметров потока по объёму ВГМ. На рис. 9 приведены значения компонент скорости V_R и V_Θ .

Как видно из представленных рисунков, винтообразные тороидальные вихри в цилиндрической части ВГМ, отмеченные

при расчёте с моделью RSM BSL, выглядят как чередующиеся области положительной и отрицательной величины V_R и наиболее ярко проявляются именно для этого варианта расчёта. Для моделей $k-\varepsilon$ EARSМ и SST этот эффект выражен заметно слабее, а для $k-\varepsilon$ и $k-\varepsilon$ RNG исчезает практически сразу после соплового ввода. Таким образом, использо-

вание анизотропной модели турбулентности RSM BSL позволяет учесть радиальный перенос массы в цилиндрической части ВГМ. Стандартные двухпараметрические модели

его не показывают совсем, либо область, где радиальный перенос существует, ограничена 2-3 витками тороидального вихря.

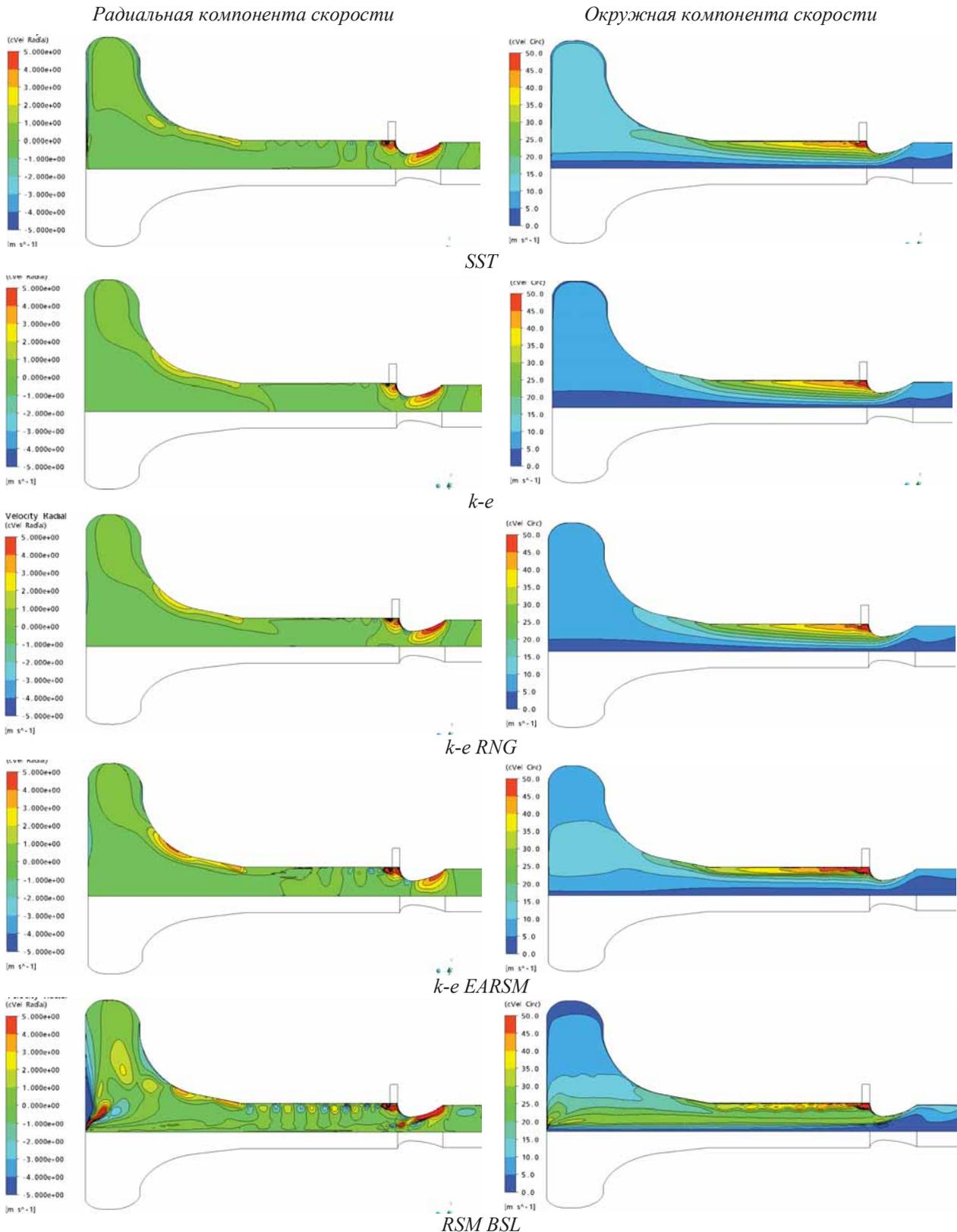


Рис. 9 Распределение радиальной и окружной компонент скорости

Учёт анизотропии заметно влияет и на распределение тангенциальной компо-

ненты скорости в цилиндрической части ВГМ. Для моделей k-ε EARSM и RSM BSL харак-

терна стратификация V_Θ для приосевого и периферийного вихрей, тогда как для моделей изотропной турбулентности величина окружной скорости снижается к оси практически линейно.

Известно, что вращение текучей среды по закону свободного вихря (вихрь Ренкина) может быть описано соотношением $V_\Theta * R = \text{const}$; по закону вращения квазитвёрдого тела $V_\Theta / R = \text{const}$.

Для выяснения законов вращения вихрей в объёме ВГМ рассмотрим графики V_Θ / R в поперечных сечениях ВГМ (рис. 10 и 11).

Из анализа графиков следует, что модели турбулентности SST, k-ε и k-ε RNG в цилиндрической и расширяющейся части ВГМ показывают вращение среды как квазитвёрдого тела. Этот тип вращения реализуется как для приосевого, так и для периферийного вихря.

Модели k-ε EARSМ и RSM BSL, учитывающие анизотропию турбулентности, показывают, что в объёме ВГМ реализуется сложное свободно-вынужденное вихревое течение. При этом результаты, полученные на моделях k-ε EARSМ и RSM BSL, сильно различаются: обе модели предсказывают повышение окружной скорости приосевого вихря в камере смешения, однако для k-ε EARSМ максимальная величина угловой скорости вращения в ~ 3 раза меньше, чем для модели RSM BSL. При продвижении от камеры смешения к соплу-диафрагме закрутка приосевого вихря для модели k-ε EARSМ значительно (в ~ 2 раза) снижается. Для модели RSM BSL также наблюдается снижение угловой скорости вращения, но не настолько значительное. Из этого можно сделать следующий вывод: причиной появления эжекции воздуха из окружающей среды, показанная моделью RSM BSL и отмеченная при экспериментальных работах [12], может являться высокая угловая скорость вращения приосевого вихря в объёме ВГМ.

Расчёты показывают, что скорость вращения приосевого вихря превосходит начальную в сопловом вводе в ~ 2 раза. Причиной этого является специфическая структура течения в камере смешения, полученная при использовании модели RSM BSL. Как было сказано выше, поток при движении к оси горелочного модуля в уз-

ком пространстве между стенкой и ограничивающим тороидальным вихрем приобретает высокую угловую скорость вращения. Это объясняется тем, что движение этого потока происходит по закону свободного вихря $V_\Theta * R = \text{const}$. На рис. 12 представлен график величины $V_\Theta * R$ в сечении вихря ($x = 5.6D_k$), а на рис. 13 структура течения в вихре.

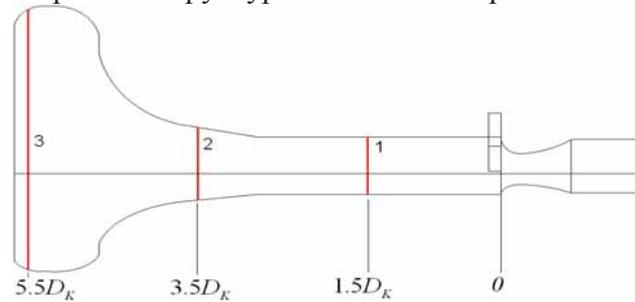


Рис. 10. Расположение сечений ВГМ: сечения 1; 2; 3 – $1.5D_k$; $3.5D_k$; $5.5D_k$ от соплового ввода

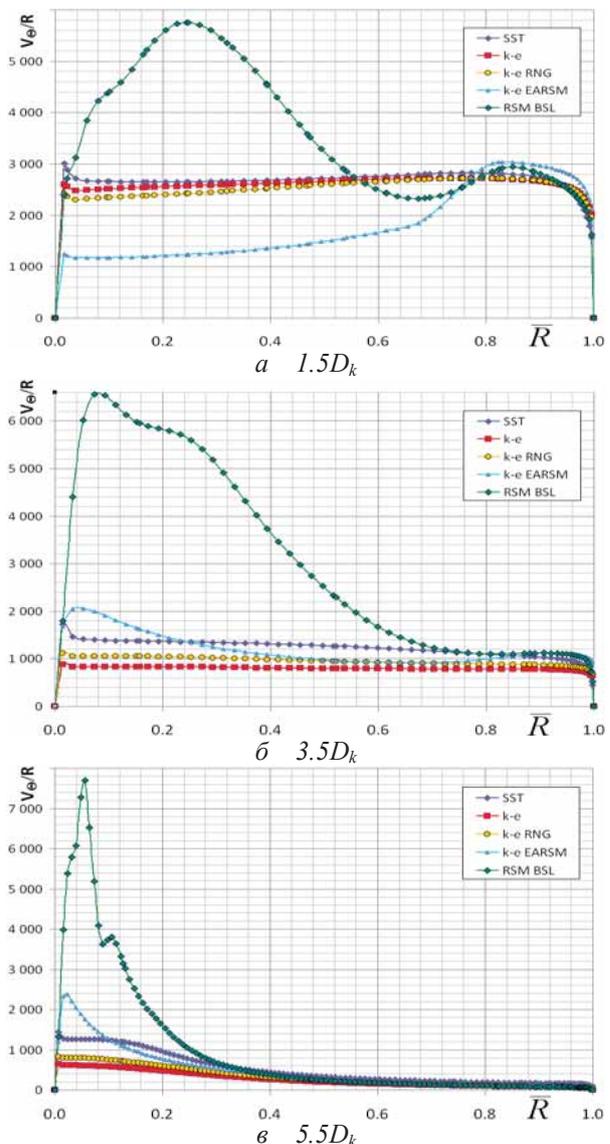


Рис. 11. Профили угловой скорости вращения V_Θ/R в сечениях (а) – 1; (б) – 2; (в) – 3

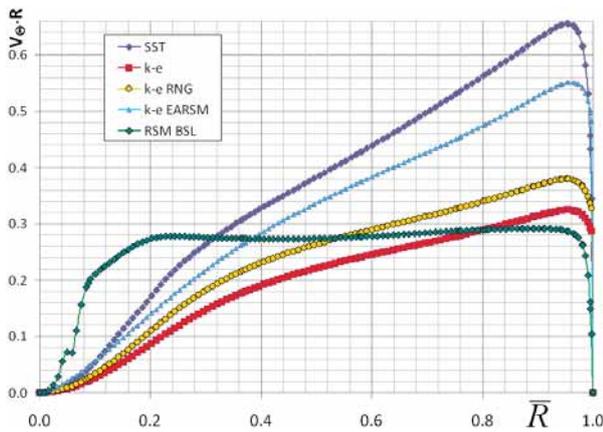


Рис. 12. Зависимость величины $V_0 \cdot R$ от радиуса в сечении $5.6Dk$

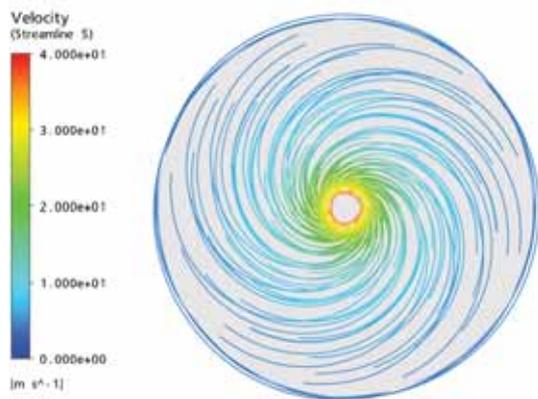


Рис. 13. Структура течения в сечении $5.6Dk$

Заключение. В результате численного моделирования с различными моделями турбулентности исследованы особенности течения в горелочном модуле с противотоком. Структура течения, полученная при использовании анизотропной модели турбулентности RSM BSL, отличается от результатов, полученных на стандартных двухпараметрических моделях $k-\epsilon$, SST, $k-\epsilon$ RNG и модели EARSM. При этом интегральные характеристики горелочного модуля слабо зависят от выбранной модели турбулентности.

Согласование структуры течения, полученной на модели RSM BSL, с наблюдаемой при экспериментах показывает перспективность применения данной модели при расчётах вихревых горелочных модулей с противотоком, в том числе и вихревых устройств других технических назначений. Тем не менее для верификации и на-

стройки модели турбулентности требуется проведение эксперимента с измерением в объёме ВГМ параметров потока и турбулентных пульсаций.

Библиографический список

1. Пиралишвили, Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев. Под ред. А.И. Леонтьева. - М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000.
2. Юн, А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений [Текст] / А.А. Юн - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. - 272 с.
3. Аэродинамика закрученного потока в вихревых горелках [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов, М.Д. Ахмед [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. - 2007. - №9. - С. 3-8.
4. ANSYS CFX Reference Guide. / ANSYS Inc.- ANSYS CFX Release 11.- 2006.
5. Гупта, А. К. Закрученные потоки [Текст] / А. К. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред; ред. С. Ю. Крашенинников. - М.: Мир, 1987. - 588 с.
6. Wallin, S., Johansson, A. "Modelling streamline curvature effects in explicit algebraic Reynolds stress turbulence models" // Journal of Fluid Mechanics.- 2000.- 403.- pp. 89-132.
7. Hellsten, A. "New advanced turbulence model for high-lift aerodynamics" // AIAA Paper 2004-1120.- Reno, Nevada, 2004.
8. ANSYS CFX Solver Modeling Guide / ANSYS Inc.- ANSYS CFX Release 11.- 2006.
9. Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor / J.L. Xia, G. Yadigaroglu, Y.S. [it al] // Int. J. Heat Mass Transfer.- 1998.- Vol. 41, No. 11.- pp. 1485-1497.
10. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. // AIAA-Journal.-1994.- 32(8).-pp. 1598 - 1605.
11. Launder, B.E. Progress in the developments of a Reynolds-stress turbulence closure / B.E. Launder, G.J. Reece, W. Rodi // J. Fluid Mechanics.- 1975.- Vol. 68.- pp.537-566.
12. Вихревые горелочные устройства [Текст] / А.И. Гурьянов, О.В. Казанцева, М.В. Медведева [и др.] // Инженерный журнал. - 2005. - № 5. - прил. - С. 8 - 15.

NUMERICAL STUDY OF GASDYNAMIC CHARACTERISTICS COUNTERFLOW BURNER WITH USE OF ANISOTROPIC MODELS OF TURBULENCE

©2011 S. A. Piralishvily, A. I. Guryanov, A. V. Badernikov

Rybinsk State Academy of Aviation Technology named P.A. Solovjov

Results of numerical simulation of viscous compressible gas in counterflow burner unit, taking into account characteristic features of flow in bounded swirling flow diaphragm walls. The calculations are performed using models of turbulence: SST, ke, RNG ke, EARSM, RSM BSL. It is shown that in the case of the Reynolds stress transport model structure of the flow has the features do not appear when using the standard two-parameter models of turbulence, but observed during the experiments.

Swirling flows, vortex burner, anisotropic turbulence model.

Информация об авторах

Пиралишвили Шота Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и технической физики Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. Тел.: 8(4855) 21-90-64. Область научных интересов: теплообмен, процессы горения, вихревой эффект.

Гурьянов Александр Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общей и технической физики Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. Тел.: 8(4855) 21-90-64. Область научных интересов: теплообмен, процессы горения.

Бадерников Артём Витальевич, аспирант кафедры общей и технической физики Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. Тел.: 8(4855) 21-90-64. Область научных интересов: теплообмен, процессы горения.

Piralishvily Shota Alexandrovich, Doctor of Engineering science, professor, the head of the department «General and Technical Physics» of the Rybinsk State Academy of Aviation Technology named P.A. Solovjov. Phone: 8(4855) 21-90-64. Area of research: heat transfer, vortex tubes, gas dynamics.

Guryanov Alexander Igorevich, Candidate of Engineering science, senior lecturer of the department «General and Technical Physics» of the Rybinsk State Academy of Aviation Technology. Phone: 8(4855) 21-90-64. Area of research: heat transfer, vortex tubes, gas dynamics.

Badernikov Artem Vitalyevich, the postgraduate of the department «General and Technical Physics» of the Rybinsk State Academy of Aviation Technology. Phone: 8(4855) 21-90-64. Area of research: heat transfer, vortex tubes, gas dynamics.