

УДК 621.438

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В КОММЕРЧЕСКОМ ПАКЕТЕ И РЕШАТЕЛЕ СОБСТВЕННОЙ РАЗРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ© 2013 В. А. Назукин¹, В. Г. Августинovich¹, В. Thornber², Р. Aguado Lopez²,
В. В. Цатиашвили³, Е. В. Коромыслов³¹ПНИПУ, г. Пермь²Cranfield University, United Kingdom³ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Представлено сравнение результатов численного моделирования течения закрученного потока в экспериментальной установке с использованием различных программных средств: коммерческого ПО ANSYS CFX и кодов высокого порядка точности собственной разработки. Проведена оценка влияния моделей турбулентности и размера расчётной сетки на результаты вычислений.

Газотурбинный двигатель, камера сгорания, компьютерное моделирование, закрученные потоки.

Актуальность сокращения эмиссии оксидов азота с выхлопными газами ГТУ сохраняется в связи с постоянным ужесточением природоохранных и здравоохранительных норм и требований. Существенное снижение выбросов оксидов азота возможно обеспечить при реализации концепции сжигания «бедной» предварительно перемешанной топливовоздушной смеси с минимальной неравномерностью поля концентрации на входе в жаровую трубу. Реализация концепции часто сталкивается с проблемами обеспечения устойчивого низкоэмиссионного сгорания, проскоком пламени и самовоспламенением в зоне подготовки смеси. Для интенсификации перемешивания целесообразно создавать смесительное устройство с завихрителями, однако при больших числах закрутки возникает высокая вероятность возникновения сложных нестационарных явлений, таких как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [1]. Оно может быть опасно тем, что периодические колебания параметров потока на входе в жаровую трубу, вызванные ПВЯ, являются одним из источников возмущения, способного привести к виброгорению [2]. Таким образом, на этапе проектирования необходимо иметь возможность правильно описывать как структуру течения за-

крученных потоков, так и распределение концентраций топливовоздушной смеси.

Цель настоящего исследования – верификация и выбор математической модели течения в премиксере и способа её реализации, определение основных требований к методике расчёта. Для этого проведено сравнение результатов расчётов течения в модельном смесителе с опубликованными результатами эксперимента [2,3]. Для расчётов использовалось коммерческое ПО ANSYS CFX, а также программные коды GHOST CFD, разработки ОАО «Авиадвигатель», FLAMENCO, университета Кренфилда. Решатель GHOST CFD реализует LES-подход (Large Eddy Simulations – Моделирование крупных вихрей) для моделирования турбулентных течений, основанный на явной узкополосной фильтрации уравнений Навье-Стокса в неконсервативной форме для идеального газа с использованием метода конечных разностей на структурированных криволинейных многоблочных сетках. Реализован 5-й порядок точности по пространству и 4-й по времени. Решатель предназначен для работы на графических картах, позволяющих значительно сокращать время выполнения одной итерации расчёта. Код FLAMENCO также использует LES-подход для сжимаемого многокомпонентного потока, реализован 5-й

порядок точности. Вычисления осуществляются на центральных процессорах. Оба решателя используют явную схему аппроксимации по времени.

Эксперимент по верификации собственного расчётного кода был проведён в университете Loughborough (Великобритания). Модельный смеситель (рис. 1) представлял собой одиночный радиальный завихритель, расположенный следом за ним кольцевой конфузурный канал и

центральный канал для подвода топлива. В качестве жидкости использовалась вода с соблюдением подобия по числам Рейнольдса с потоком воздуха в реальных смесителях. С помощью фиксирующей аппаратуры (измеритель скорости частиц и лазерный доплеровский анемометр) был зарегистрирован процесс распада вихря с образованием прецессирующего вихревого ядра.

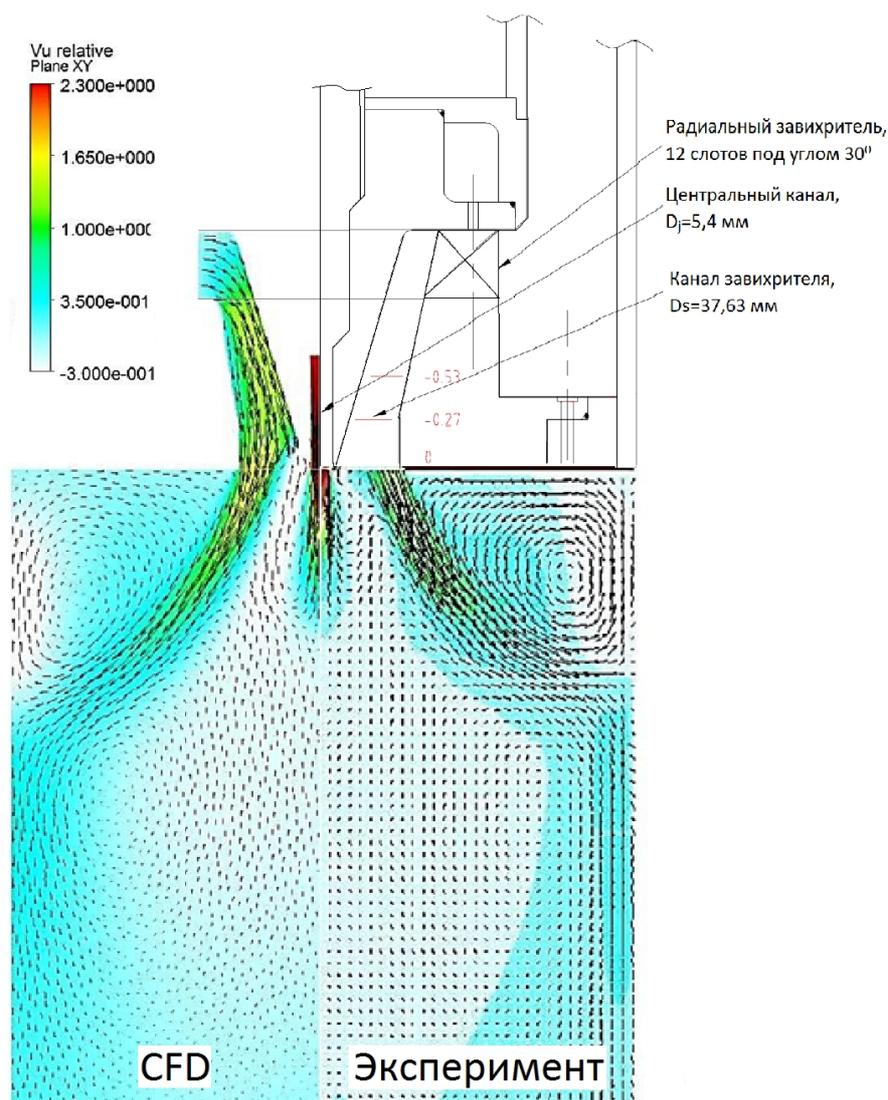


Рис. 1. Структура течения в эксперименте и CFD расчёте

В ANSYS CFX были проведены стационарные и нестационарные расчёты течения несжимаемой жидкости с различными моделями турбулентности (k-ε, SST, DES), использовались две расчётные сетки, отличающиеся друг от друга плотностью

элементов в области смесителя, их общее число составляло 4,8 и 13,3 млн. Граничные условия были определены на основании результатов эксперимента. Для центрального канала задавался незакрученный поток с расходом 0,11176 кг/с, а через

завихритель – под углом 54° к радиусу с расходом 2,29142 кг/с. Значения расходов были найдены при известных величинах площадей и средних скоростей в эксперименте, а закрутка потока на входе – исходя из закона сохранения момента импульса, G_θ , вычисленного посредством интегрирования профилей скорости на выходе из премиксера. На выходе из расчётной области задавалось статическое давление 1 атм. Качественно структуры течения в стационарных, а также полученные при осреднении во времени результатов нестационарных расчётов, хорошо согласуются с экспериментом (рис. 1) и между собой, совпадают форма и положение зон обратных токов, угол раскрытия потока,

величина проникновения центральной струи, однако количественные параметры отличаются. На рис. 2 вверху представлены профили осевой и окружной скоростей в плоскости выхода из смесителя, обезразмеренные относительно средней скорости на выходе из канала смесителя, $V_{x,s1}=2,13$ м/с. Здесь и в дальнейшем геометрические размеры были отнесены к диаметру выхода из канала смесителя, $D_s=37,63$ мм. Видно, что результаты нестационарных расчётов лучше согласуются с экспериментом, при этом наименьшее расхождение соответствует использованию DES модели турбулентности, особенно на расчётной сетке со сгущением в канале завихрителя.

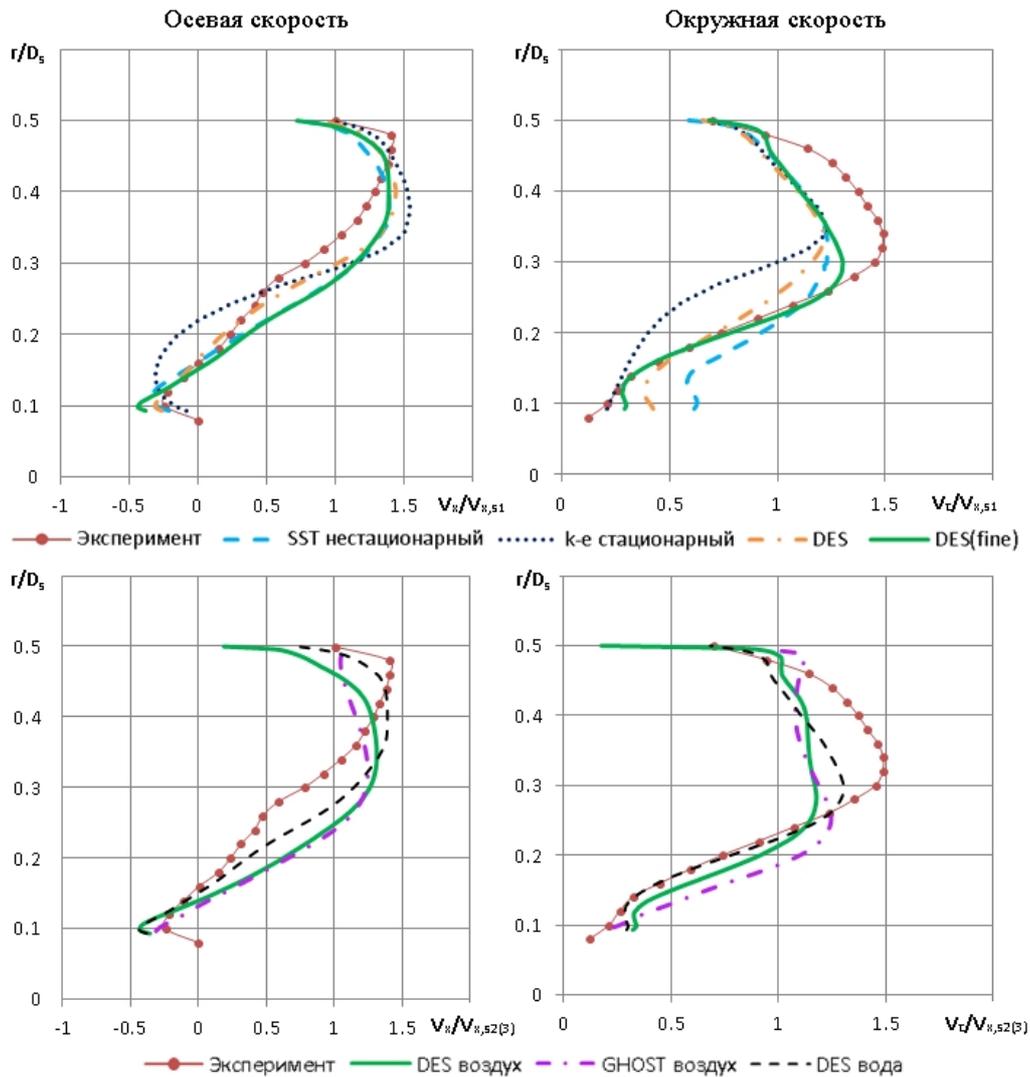


Рис. 2. Профили осевой и окружной скоростей в сечении выхода из смесителя для расчета течения несжимаемой жидкости (сверху) и сжимаемой (снизу)

Наибольший интерес с точки зрения использования данного решателя и моделей турбулентности для расчётов процесса смешения топлива и воздуха в премиксере КС представляет возможность точного прогнозирования процессов, происходящих в канале смешения и на выходе из него. На рис. 3 вверху показано векторное поле скорости в плоскости выхода из смесителя. Для лучшей идентификации вихревых структур было использовано раз-

ложение по Рейнольдсу, то есть вычитание из мгновенного поля скорости осреднённого. В расчёте, как и в эксперименте, вихревая картина представляет собой два сильных вихря, расположенных напротив друг друга, и два слабых, находящихся между ними. Все вихревые структуры вращаются вокруг оси канала, что свидетельствует о наличии ПВЯ. Спиральные вихри возникают вблизи выхода из канала премиксера в результате распада вихря.

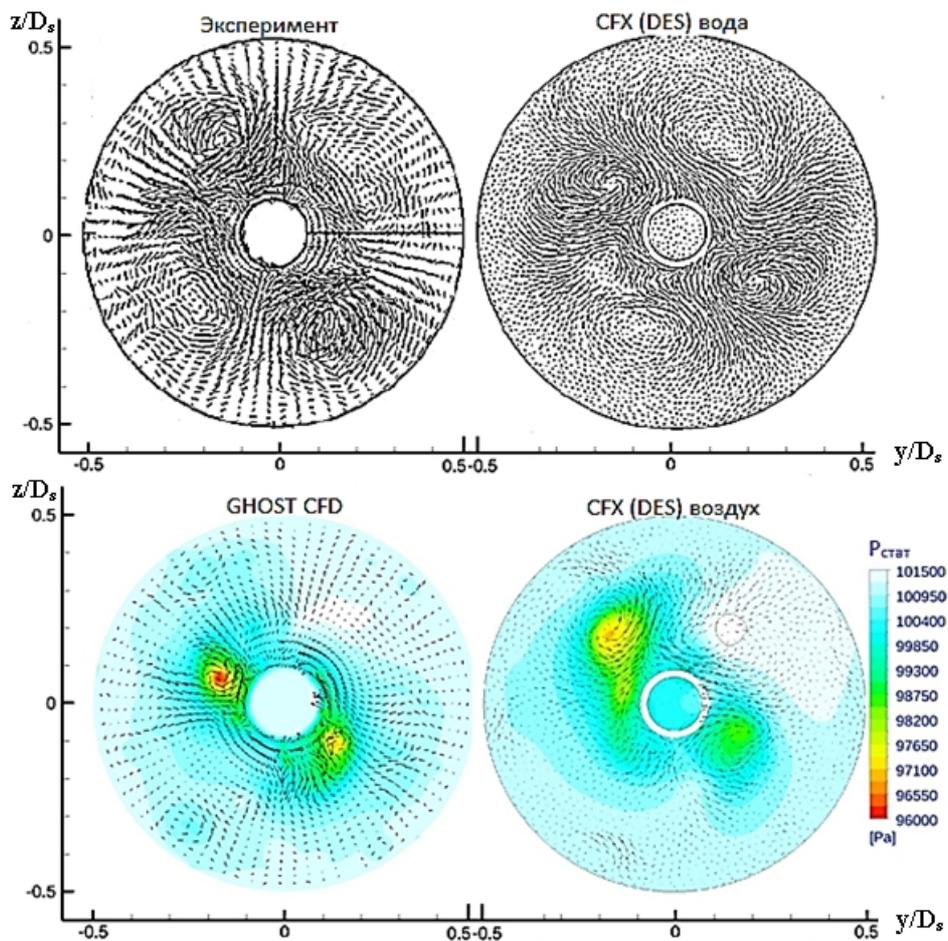


Рис. 3. Векторные поля скорости с разложением по Рейнольдсу в плоскости выхода из смесителя

DES модель турбулентности позволяет достаточно точно предсказать такие сложные нестационарные явления, однако требует больших вычислительных затрат. SST модель лишена этого недостатка, но не позволяет правильно описывать сложные вихревые структуры, возникающие в премиксере. Происходит искажение вих-

ревой картины из-за использования гипотезы о локально-изотропной турбулентности, в то время как в эксперименте присутствует заметное различие масштаба турбулентности в продольном и поперечном направлениях [2]. В качестве интегрального критерия оценки результатов расчёта использовалось сравнение спек-

тров колебаний осевой скорости в точке с координатами $x/D_s=0,27$, $r/D_s=0,27$. В эксперименте были зафиксированы частоты 75 и 150 Гц, низшая частота связана с присутствием двух сильных вихрей, а большая – двух сильных и двух слабых. При расчёте на сетке со сгущением с DES

моделью двум пикам на амплитудно-частотной характеристике соответствуют частоты 86 и 172 Гц (на рис. 4 справа). Таким образом, можно утверждать, что полученная вихревая картина соответствует экспериментальной.

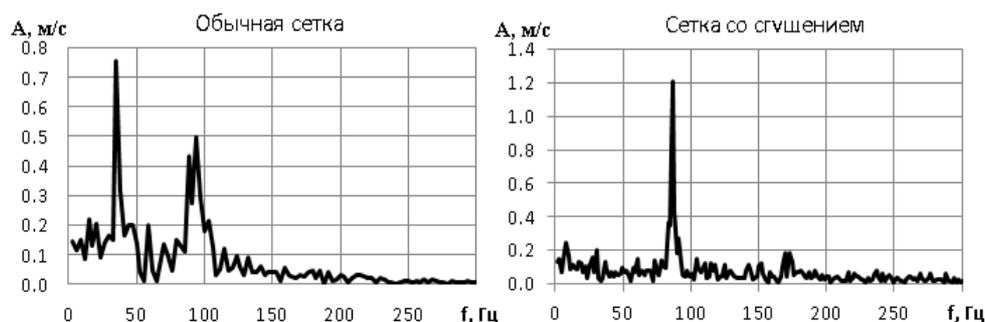


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики колебаний осевой скорости при DES расчетах течения несжимаемой жидкости

Влияние расчётной сетки проявляется следующим образом: размер элементов в области смесителя не оказывает существенного влияния на осреднённые во времени картину течения и профили скорости, однако происходит изменение во времени интенсивности и взаимного углового положения прецессирующих вихрей. Таким образом, при увеличении размера элементов происходит потеря устойчивости вихревых структур и, как следствие, искажение спектральных характеристик. Вращению более сильного вихря соответствует частота 35,3 Гц, а двух – 91,4 Гц (на рис. 4 слева). Для четырёх вихрей пик не наблюдается.

Поскольку программные коды GHOST CFD и FLAMENCO приспособлены для расчёта течения только сжимаемых жидкостей, для сравнения всех решателей были проведены расчёты течения воздуха в модели установки. Граничные условия подбирались так, чтобы обеспечить равенство чисел Рейнольдса на выходе из смесителя. При расчёте в GHOST CFD использовались два варианта расчётной сетки, состоящие из 5 и 10,8 млн. гексаэдральных элементов, при этом профили скорости практически не отличаются. В расчётах с кодом FLAMENCO из-за большого времени расчёта на централь-

ных процессорах использовалась более грубая сетка из 158 тыс. элементов. Для сравнения с экспериментом и расчётом течения воды полученные скорости обезразмеривались относительно средней скорости на выходе из наружного канала смесителя, составляющей $V_{x,s_2}=31,54$ для CFX и GHOST CFD и $V_{x,s_3}=30,89$ для FLAMENCO. На рис. 2 внизу представлены профили осевой и окружной скоростей на выходе из смесителя в сравнении с экспериментом и расчётом течения несжимаемой жидкости. Наблюдается небольшое увеличение значения скорости при $r/D_s < 0,3$, которое может быть связано со сжимаемостью потока. GHOST CFD точнее предсказывает распределение осевой скорости вблизи наружного диаметра канала, но менее точно распределение окружной. В целом же из-за низких скоростей потока результаты, полученные при расчёте течения воды и воздуха, хорошо согласуются друг с другом. При сравнении структуры течения видно, что при расчёте в CFX возникающие отрывы локализуются раньше, что связано с высоким порядком точности GHOST CFD и, следовательно, меньшим влиянием разностной схемы на решение.

На рис. 5 изображены осреднённые во времени профили осевой скорости в

различных сечениях по оси. Результаты, полученные в ANSYS CFX и GHOST CFD, хорошо совпадают с экспериментом вблизи выхода из смесителя, в сечениях же $x/D_s=1,06$ и $x/D_s=2,65$ наблюдается одинаковый характер изменения скорости, но колебания в расчёте несколько выше. Результаты решателя FLAMENCO заметно хуже согласуются с эксперимен-

том, однако отрицательная осевая скорость вблизи оси и около наружного радиуса говорит о наличии центральной и угловой рециркуляционных зон. Большие отличия структуры течения могут быть результатом очень грубой расчётной сетки, а также особенностей задания граничных условий.

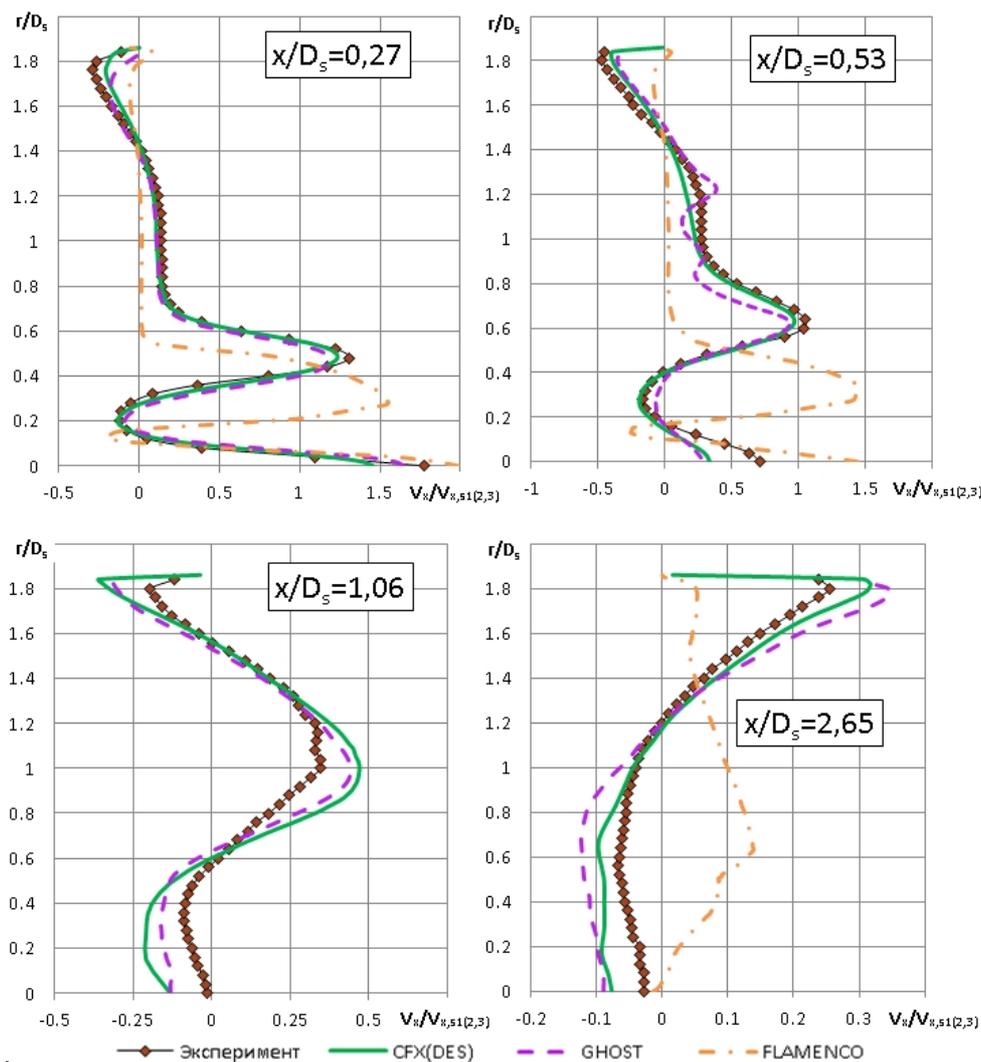


Рис. 5. Профили скорости в различных сечениях вдоль оси смесителя

При рассмотрении векторных полей скорости с разложением по Рейнольдсу в плоскости выхода из смесителя, изображённых на рис. 3, видно, что прецессирующее вихревое ядро захватывается и в расчётах с воздухом. Отличие состоит в том, что в расчётах течения сжимаемой жидкости как в CFX, так и в GHOST CFD интенсивность и угловое положение вих-

ревых структур являются неустойчивыми. Увеличение дискретизации расчётной области и достижение величины безразмерного параметра y^+ 2-4 вместо 5-10 не привело к получению устойчивого решения. Таким образом, при течении сжимаемой жидкости из-за большего количества возмущений структура прецессирующего вихревого ядра, скорее всего, является

менее устойчивой. Эти возмущения лучше разрешаются с использованием решателей высокого порядка точности, таких как GHOST CFD и FLAMENCO, так как они меньше «размывают решение». Из-за неустойчивости изменяются спектральные характеристики, вместо отдельных пиков возникают диапазоны частот, соответствующие вращению одного или двух прецессирующих вихрей.

О наличии ПВЯ может свидетельствовать также поле статического давления, которое показано на рис. 3 внизу. Наблюдаются области пониженного дав-

ления, соответствующие двум прецессирующим вихрям. Статическое давление также можно использовать для определения спектральных характеристик вихревых структур. Наконец, присутствие ПВЯ возможно установить при рассмотрении профилей среднеквадратичного отклонения окружной скорости (рис. 6), полученного при использовании кода FLAMENCO. Хотя количественные значения отличаются по обозначенным выше причинам, в расчёте захватываются все пики, которые в соответствии с [2] показывают, что алгоритм успешно моделирует ПВЯ.

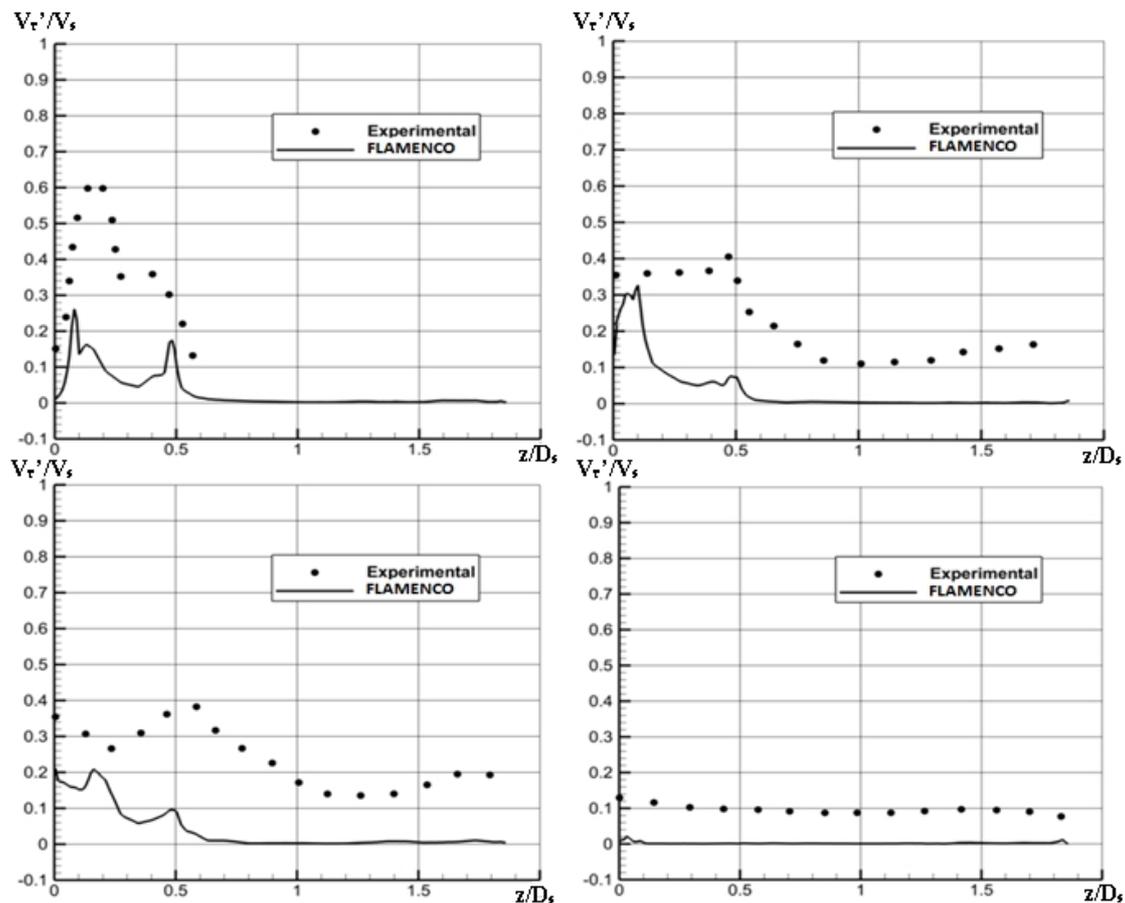


Рис. 6. Профили среднеквадратичного отклонения окружной скорости

Таким образом, для детального определения структуры течения в смесительных устройствах возможно использование LES (GHOST CFD, FLAMENCO) или DES (CFX) -подходов, поскольку при достаточной дискретизации расчётной области они позволяют с высокой точно-

стью описывать структуру течения. Поскольку решатели высокого порядка точности не «размывают» решение, их целесообразно использовать для определения возможных мест возникновения вихревых структур, их распространения и влияния на структуру потока. Из-за того, что в

GHOST CFD и FLAMENCO реализована явная аппроксимация по времени, для установления решения, получения достаточной статистической выборки для осреднения и тем более определения спектральных характеристик требуется значительно большее число итераций. В связи с этим использование данных кодов на сетках с достаточным количеством элементов представляется возможным лишь при реализации расчетов на графических картах, при этом физическое время моделирования совпадает с CFX по порядку величины.

На следующем этапе исследования планируются организация эксперимента по определению полей концентрации в закрученных потоках и сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

Библиографический список

1. Гупта, А. Закрученные потоки [Текст] / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред; пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 588 с.
2. Midley, K. Unsteady Flow Structures in Radial Swirl Fed Fuel Injectors [Text] / K. Midgley, A. Spencer, J. J. McGuirk. Paper No. GT2004-53608, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, June 14-17, 2004, Vienna, Austria;
3. Dunham, D. Comparison of URANS and LES Methodologies for Air Swirl Fuel Injectors [Text] / D. Dunham, A. Spencer, J. J. McGuirk, M. Dianat. Paper No. GT2008-502786 Proceeding of ASME Turbo Expo 2008, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.

TEST CASE OF 3D UNSTEADY SWIRLING FLOWS MODELING USING COMMERCIAL AND IN-HOUSE CODES

© 2013 V. A. Nazukin¹, V. G. Avgustinovich¹, B. Thornber², P. Aguado Lopez², V. V. Tsatiashvili³, E. V. Koromyslov³

¹ Perm National Research Polytechnic University

² Cranfield University, United Kingdom

³ «Aviadvigatel» plc

The paper gives the comparison of the results of turbulent flow computational modeling in an experimental rig using various software environments: commercial ANSYS CFX software and original Higher-Order Accuracy Codes. The effects of turbulence models and computational grid size on the computation data are evaluated.

Gas turbine, combustor, computational modeling, swirling flows.

Информация об авторах

Назукин Владислав Алексеевич, аспирант, Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет; инженер-конструктор ОАО «Авиадвигатель». E-mail: v.a.naz@narod.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование течения закрученных потоков, процессов перемешивания, горения.

Августинovich Валерий Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели», Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет; заместитель начальника ОКБ по науке ОАО «Авиадвига-

тель». E-mail: august@avid.ru. Область научных интересов: моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях.

Цатиашвили Вахтанг Валерьевич, заместитель начальника отдела камер сгорания, ОАО «Авиадвигатель». E-mail: vtsati@mail.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Коромыслов Евгений Васильевич, инженер-конструктор-расчетчик отдела систем инженерного анализа, ОАО «Авиадвигатель». E-mail: koromyslov@avid.ru. Область научных интересов: разработка компьютерных кодов высокого порядка точности для расчета динамики жидкости.

Ben Thornber, PhD, Университет г. Кренфилда, Великобритания. Область научных интересов: разработка компьютерных кодов высокого порядка точности для моделирования турбулентных многокомпонентных потоков.

Pablo Aguado Lopez, Университет г. Кренфилда, Великобритания. Область научных интересов: программирование кодов для вычислительной газовой динамики.

Nazukin Vladislav Alekseevich, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University; design engineer, «Авиадвигатель» plc. E-mail: v.a.naz@narod.ru. Area of research: computational modeling of swirling flows, mixing and combustion processes.

Augustinovich Valery Georgievich, doctor of technical science, the department of aircraft engines, Perm National Research Polytechnic University; science vice head of motor design bureau, «Авиадвигатель» plc. E-mail: august@avid.ru. Area of research: computational modeling of unsteady phenomena in aircraft engines.

Tsatiashvili Vakhtang Valeryevich, vice head of the department of combustion chambers, «Авиадвигатель» plc. E-mail: vtsati@mail.ru. Area of research: computational modeling of processes in combustor chambers of aircraft engines

Koromyslov Eugene Vasilyevich, design and calculating engineer, «Авиадвигатель» plc. E-mail: koromyslov@avid.ru. Area of research: development of high order accuracy codes for fluid dynamics.

Ben Thornber, PhD, Cranfield University. Area of research: development of high order accuracy codes for modeling of multiphase turbulent flows.

Pablo Aguado Lopez, Cranfield University. Area of research: development of codes for computational fluid dynamics.