УДК 621.165–253.5:620.193.1

А.И. Кириллов, С.А. Галаев,
В.Ю. Исупов, Е.М. Смирнов

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ МЕТОДОВ К РАСЧЕТУ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЫХОДНОМ ДИФФУЗОРЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

A.I. Kirillov, S.A. Galaev,
V.Yu. Isupov, E.M. Smirnov

APPLICATION OF EDDY RESOLVING METHODS TO THE CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW IN A GAS TURBINE EXHAUST DIFFUSER

Приведена мотивация к постановке расчетов трехмерного нестационарного турбулентного течения в кольцевом диффузоре с силовыми стойками, установленном на выходе из мощной газовой турбины. Рассмотрены два варианта из числа вихреразрешающих методов, реализованных в пакете ANSYS FLUENT. Приведены результаты предварительных тестовых расчетов отрывного обтекания крылового профиля с применением URANS и IDDES методов. Проведено численное моделирование турбулентного течения для реальных условий работы выходного диффузора и в сопоставлении с экспериментальными данными оценена возможность URANS и IDDES методов по предсказанию характеристик его эффективности. Показано явное превосходство метода IDDES.

ГАЗОВАЯ ТУРБИНА; ВЫХОДНОЙ ДИФФУЗОР; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИЕ МЕТОДЫ.

The article is aimed at showing motivation to setting computations of three-dimensional unsteady turbulent flow in an annual powerful gas-turbine exhaust diffuser with power struts. Two variants of eddy resolving methods among those implemented in the ANSYS FLUENT package are considered. Results of auxiliary test computations of separated flow around an airfoil performed with the URANS and the IDDES methods are presented. It has been conducted numerical simulation of turbulent flow in the exhaust diffuser under real conditions of its work. Comparing to the test data, it is evaluated capabilities of the URANS and the IDDES methods with respect to accuracy of diffuser efficiency prediction. It is shown evident superiority of the IDDES method.

GAS TURBINE; EXHAUST DIFFUSER; NUMERICAL SIMULATION; EDDY RESOLVING METHODS.

Выходной диффузор — важнейший элемент проточной части газовой турбины, значительно влияющий на эффективность и эксплуатационные характеристики газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ). Диффузор, как правило, представляет собой плавно расширяющийся кольцевой канал с прямолинейной осью. В нем размещены радиально ориентированные силовые стойки аэродинамического профиля, соединяющие задний подшипник ротора с корпусом турбины. Силовые стойки обычно имеют симметричную относительно меридианной плоскости форму, а эквивалентный угол раскрытия диффузора не превышает 10–11°. Проточную часть диффузора в первом приближении формируют в соответствии с широко известными рекомендациями (см., например, [1, 2]), которые сформулированы в результате обобщения экспериментов, выполненных на классических лабораторных стендах для однородного стационарного потока при входе в диффузор.

Однако даже на номинальном режиме работы ГТУ, когда поток при входе в диффузор имеет близкое к осевому направление, сформированное последней ступенью течение перед диффузором все же оказывается неоднородным и нестационарным. На нерасчетных режимах работы ГТУ, когда входящий в диффузор поток сильно закручен и обтекание силовых стоек с большими углами атаки сопровождается отрывом пограничного слоя, явления нестационарности возникают также и во внутренней области течения. Входная неоднородность и нестационарность течения заметно влияют на эффективность диффузора, а нестационарность — и на его акустические характеристики. Поэтому выбранную в первом приближении конфигурацию проточной части для выходного диффузора газовой турбины необходимо корректировать по результатам модельных испытаний и/или расчетного анализа трехмерной структуры течения.

Достоверность данных модельных испытаний во многом определяется качеством моделирования граничных условий на входе в диффузор, которые в наибольшей мере соответствуют натурным, когда объектом исследования является блок «последняя ступень турбины — выходной диффузор». Подробные экспериментальные данные о характеристиках и структуре течения в таком блоке впервые получены в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) [3–7]. Они позволяют не только изучить особенности течения в диффузоре практически в натурных условиях, но и исследовать эффекты взаимного влияния последней ступени и диффузора.

Постановка нестационарной задачи

Создание экспериментального блока «последняя ступень турбины — выходной диффузор» и проведение опытов на нем — чрезвычайно трудоемкое и весьма затратное мероприятие. Поэтому целесообразно, используя в качестве тестовых уже полученные экспериментальные данные, разработать методику численного моделирования, адекватно воспроизводящую трехмерную структуру нестационарного течения в блоке. Постановка нестационарной задачи в данном случае особенно актуальна, поскольку попытки численного моделирования трехмерного течения в диффузоре, работающем в составе блока, выполненные в стационарной постановке [4, 6, 7], даже при учете входной неравномерности потока не привели к удовлетворительному результату.

Решению поставленной задачи и посвящена поддержанная Российским фондом фундаментальных исследований работа (грант РФФИ № 14-08-00553), которую ведет группа, состоящая из студентов, аспирантов и преподавателей кафедр «Гидроаэродинамика», «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» и «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ. На первом этапе исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, решается задача выбора метода для расчета трехмерного нестационарного течения в изолированном кольцевом диффузоре с силовыми стойками. Расчеты проводились с использованием гидрогазодинамического программного пакета ANSYS FLUENT [8], нашедшего в последние годы широкое применение для численного анализа течений в областях сложной геометрии, к которым относятся и проточные части газовых турбин.

Заметим также, что современные ГТД и стационарные ГТУ, спроектированные как самостоятельный агрегат или для работы в составе парогазовой установки, имеют высокую начальную температуру газа (порядка 1500 °С), а следовательно, и высокую температуру газа в выходном диффузоре (более 600 °С). Поэтому для проектанта будут представлять также значительный интерес достоверные расчетные данные о теплообмене и температурном состоянии несущих деталей конструкции, которые можно получить, зная реальную структуру течения в диффузоре.

Вихреразрешающие методы

Результаты настоящей работы получены с применением двух подходов к расчету турбулентного трехмерного течения в диффузоре, которые с той или иной степенью полноты и адекватности позволяют численно воспроизвести нестационарные вихревые образования, возникающие при отрыве потока от силовых стоек.

Первый из подходов основан на решении осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье — Стокса (Unsteady Reynolds Averaged Navier — Stokes, URANS), дополненных

полуэмпирическими замыкающими соотношениями (модель турбулентности). Поскольку в этом случае модель турбулентности отражает вклад почти полного спектра турбулентных пульсаций в процессы перемешивания, то можно рассчитывать только на воспроизведение наиболее крупномасштабных, низкочастотных вихревых структур, развивающихся вследствие внутренней неустойчивости свободных (оторвавшихся) сдвиговых слоев. При всех своих недостатках метод URANS привлекателен тем, что для его реализации требуются сравнительно умеренные вычислительные ресурсы. Относительно проблемы выбора замыкающей модели турбулентности можно лишь еще раз констатировать, что к настоящему времени разработано огромное число полуэмпирических моделей, однако ни одна из них не обладает свойством универсальности. Вместе с тем в последние годы для расчета течений как безотрывных, так и с локализованным отрывом все чаще применяют $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) модель Ментера [9], позволяющую получить приемлемые по точности решения многих прикладных задач (как правило, в рамках стационарной постановки). Эта модель и была использована для расчетов в настоящей работе.

Второй, более затратный, подход является гибридным, сочетающим вычисления по RANS-модели в пристеночных турбулентных пограничных слоях с численным моделированием крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) в отрывной области. Этот RANS/LES-подход, базовые положения которого подробно изложены в работах [10, 11], известен как метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation, DES). В методе DES для всей расчетной области используется единая модель турбулентности, которая выполняет функцию модели подсеточной (неразрешаемой) турбулентности в областях LES (областях отсоединенных вихрей) и модели RANS в остальных областях. Алгоритмически переход к LES модели происходит там, где локальный линейный масштаб турбулентности, определяемый моделью RANS, превосходит размер ячеек расчетной сетки. Такая ситуация имеет место вдали от стенок (при условии достаточной измельченности расчетной сетки в области, которую исходно предполагается охватить LES расчетами). Следует отметить также, что вблизи стенок, где модель турбулентности работает как обычная RANS модель, решение также нестационарно. Представляемые ниже RANS/LES расчеты проведены с использованием усовершенствованного варианта метода моделирования отсоединенных вихрей, разработанного в [12] и обозначаемого как IDDES. С некоторыми модификациями [13] он реализован в пакете ANSYS FLUENT для случая использования $k-\omega$ SST модели турбулентности в качестве базовой.

Результаты тестовых расчетов*

Ниже приведены результаты двух серий тестовых расчетов трехмерного турбулентного нестационарного течения с развитым отрывом. Первая из них, в которой рассматривалось отрывное обтекание крылового профиля, (задача 1) была направлена на отработку методики расчетов по вихреразрешающим моделям с применением гидрогазодинамических программных пакетов компании ANSYS Inc. Цель второй серии расчетов (задача 2) заключалась в оценке возможностей URANS и IDDES методов по предсказанию эффективности выходного диффузора газовой турбины путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными.

Задача 1. Рассматривается задача расчета аэродинамических характеристик крылового профиля NACA 0012 при его (статистически двумерном) обтекании с большими положительными углами атаки, когда за профилем формируется обширная зона отрыва. Число Рейнольдса, построенное по скорости набегающего потока и хорде профиля, составляет 10^5. Эта задача была решена еще разработчиками метода DES [14] и может считаться классической. Однако детали ее численного решения с применением ANSYS FLUENT неизбежно будут отличаться от использованного в [14] численного метода.

Из существенных различий отметим, во-первых, применение в пакете ANSYS FLUENT интерполяционной процедуры второго порядка при вычислении конвективных потоков сквозь грани расчетных ячеек (контрольные объемы), тогда как в программном инструментарии работы [14] реализованы численные схемы более высокого порядка. Ограничения по порядку

*В тестовых расчетах принимал участие студент А.Ю. Конин.

интерполяции, свойственные расчетному алгоритму коммерческого пакета, — следствие организации вычислений на неструктурированных сетках, т. е. применения технологии, ориентированной на численный анализ трехмерных течений в областях сложной геометрии, с приемлемыми для практического использования затратами вычислительных ресурсов и усилий на генерацию расчетных сеток.

Вторая особенность пакета ANSYS FLUENT — возможность использование решателя NITA, реализующего полунеявную схему дробных шагов (Fractional Step) [8] и позволяющего заметно снизить затраты вычислительного времени. Заметим, что именно возможность применения решателя NITA, имеющаяся в пакете ANSYS FLUENT, определила предпочтение, отданное ему в нашем исследовании перед пакетом ANSYS CFX, прежде всего при проведении расчетов по методу DES.

При расчетах методом IDDES использовалась расчетная область с внешней круговой границей, радиус которой составлял 15 хорд профиля. Размер области в поперечном направлении, по которому накладываются условия периодичности, равнялся одной хорде профиля. Сгенерированная расчетная сетка содержала 1,58 млн ячеек. Безразмерный шаг по времени составлял 0,002. Кроме уже упомянутого решателя NITA, использованы следующие опции пакета [8]:

противопоточная схема второго порядка (Second Order Upwind) для интерполяции турбулентных характеристик на грани ячейки;

неявная схема второго порядка (Second Order Implicit) для аппроксимации производных по времени;

схема Standard для вычисления градиентов;

схема Least Squares Cell Based для интерполяции давления на грань ячейки.

Расчеты методом URANS, как и в работе [14], выполнены в двумерной постановке с шагом по безразмерному времени 0,01. В этом случае применялся решатель [8], основанный на алгоритме SIMPLEC. Остальные вычислительные опции в расчетах методом URANS те же, что в расчетах методом IDDES. Размер сетки для расчетов по методу URANS составлял 52,8 тыс. ячеек (фактически именно эта сетка транслировалась в третьем направлении при генерации сетки для расчетов по методу IDDES).

В целом полученные с применением ANSYS FLUENT результаты для нестационарной структуры течения и интегральных характеристик профиля NACA0012 находятся в удовлетворительном соответствии с данными [14]. Не останавливаясь на деталях структуры течения, приведем лишь результаты (рис. 1) для осредненного во времени коэффициента лобового сопротивления профиля.

Как следует из рис. 1, результаты расчетов, выполненных методом URANS в пакете ANSYS FLUENT, весьма близки к приведенным в работе [14] расчетным данным. Это заключение справедливо как для области безотрывного течения, так и для области обтекания профиля с обширным отрывом. На режимах течения с отрывом наши расчеты по методу IDDES привели к расхождению результатов с данными [14] примерно на 10 %. При этом рассогласование расчетных и экспериментальных данных не превышает 15 %, что можно считать приемлемым. Особенно, если принять во внимание, что в зоне $\alpha > 40°$ значения коэффициента лобового сопротивления, вычисленные методом URANS, превышают экспериментальные в полтора—два раза.

При вычислении осредненных во времени значений интегральных характеристик отрывного течения, которые рассчитаны методом моделирования отсоединенных вихрей, следует

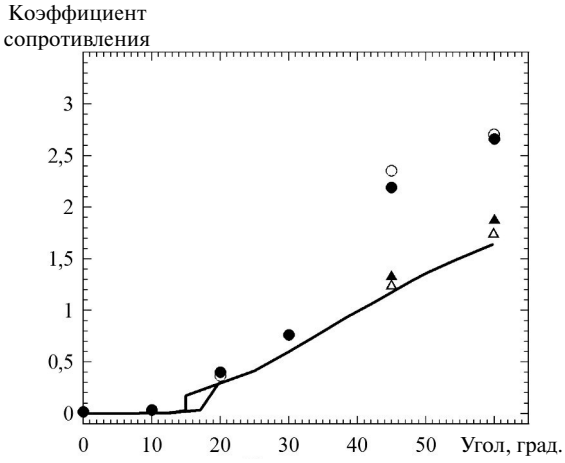

Рис. 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла атаки α для профиля NACA 0012: заполненные символы — результаты настоящих расчетов, незаполненные символы — расчетные данные [14]

——— – эксперимент; ○, ● — URANS; △, ▲ — DES

учитывать, что воспроизведенная этим методом близкая к реальной структура нестационарного течения характеризуется существенно более богатым спектром пространственных и временных масштабов, чем рассчитанная методом URANS. Как следствие, для расчетов по методу DES характерно, во-первых, повышенное время (и, особенно, число временных шагов) выхода результатов вычислений на статистически установившийся режим, данные осреднения которого можно сопоставлять с полученными при стационарных измерениях. Во-вторых, для вычисления этим методом достоверного значения осредненной во времени интегральной характеристики течения необходимо использовать бóльшую по времени выборку ее мгновенных значений. Сказанное иллюстрируется приведенными на рис. 2 расчетными данными об эволюции во времени коэффициента лобового сопротивления профиля NACA 0012.

Задача 2. Конфигурация расчетной области соответствовала форме проточной части выходного диффузора с пятью симметричными силовыми стойками, экспериментально исследованного в составе блока «последняя ступень турбины — выходной диффузор» [6]. Для сокращения вычислительного времени расчетная область содержала лишь одну стойку и один сектор диффузора с углом 72° (рис. 3), на границах которого ставились условия периодичности. В расчетную область, помимо диффузора, включен также участок атмосферы с целью смягчения влияния выходного граничного условия (задавалось постоянное по границе и во

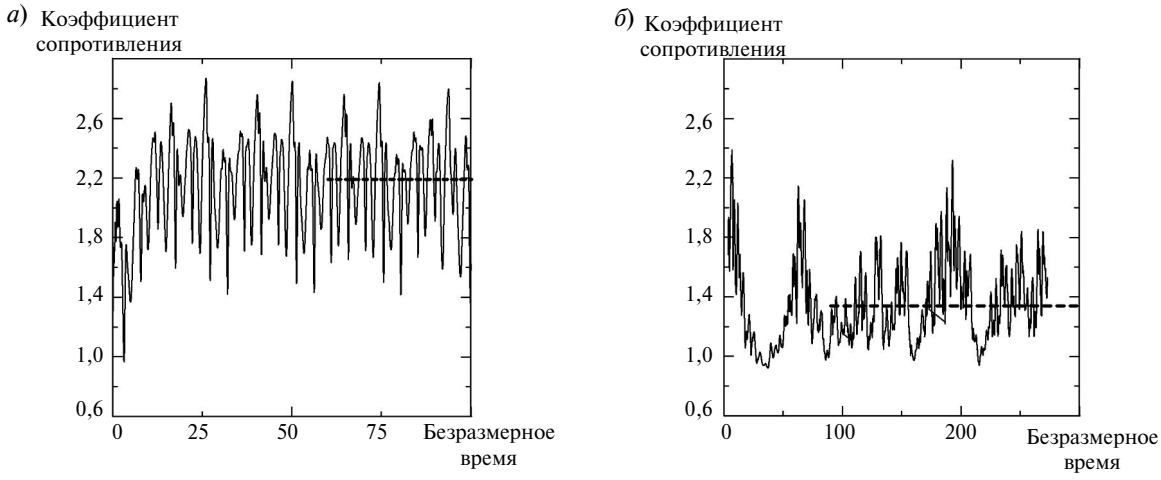

Рис. 2. Изменение во времени коэффициента лобового сопротивления профиля NACA 0012 при обтекании под углом атаки 45°:

а — метод URANS, *б* — метод IDDES (штриховой линией показано среднее значение)

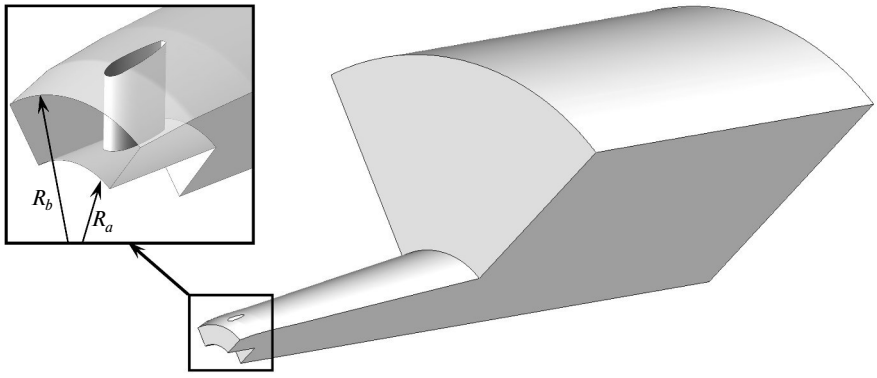

Рис. 3. Расчетная область при численном моделировании течения в диффузоре: $R_a = 0{,}121$ м, $R_b = 0{,}222$ м

времени давление). Размер расчетной сетки составлял 4,29 млн ячеек.

На входе в расчетную область задавались профили полного давления и температуры торможения, а также направление течения (рис. 4), измеренные в опытах путем траверсирования потока 3D-зондами [6]. Степень турбулентности входного потока была принята равной 1,5 %, отношение турбулентной вязкости к молекулярной — 10. Уровень, от которого отсчитывалось избыточное давление, составлял 101325 Па.

Рис. 4 показывает, что поток перед диффузором неоднороден как по температуре, так и по давлению торможения. На протяжении примерно 60 % высоты стойки он отклоняется от осевого направления на угол около 20° Особенно велико отклонение потока в районе внутренней обечайки диффузора, где оно достигает 50°.

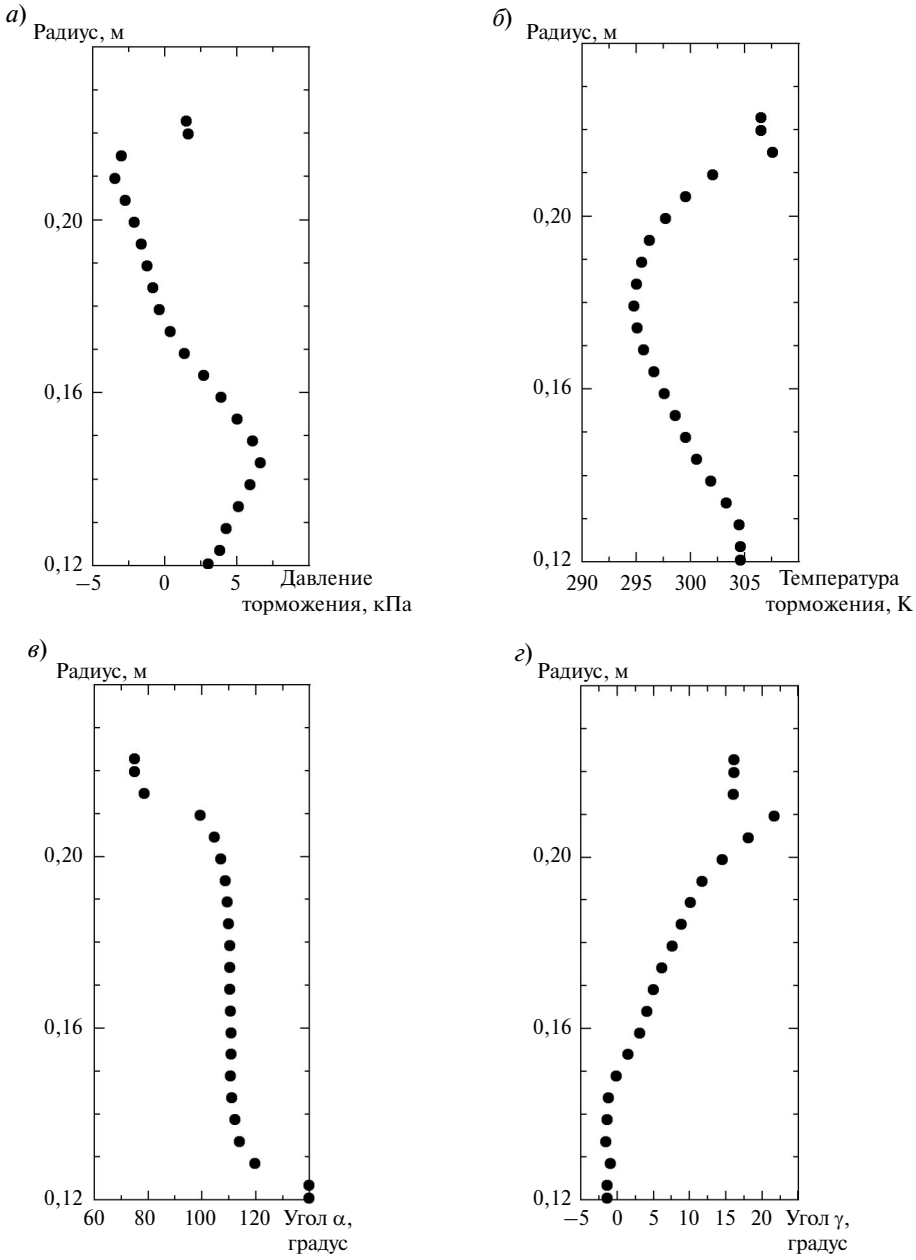

Рис. 4. Граничные условия на входе в диффузор:

а — избыточное давление торможения; *б* — температура торможения; *в* — направление потока в тангенциальной плоскости (α); *г* — направление потока в меридианной плоскости (γ)

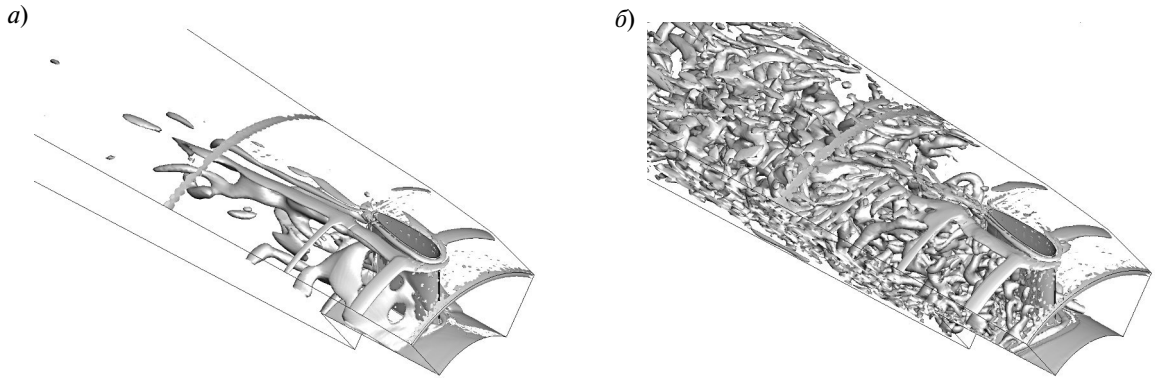

Рис. 5. Изоповерхности Q-критерия для течения в диффузоре:
а — URANS; *б* — IDDES

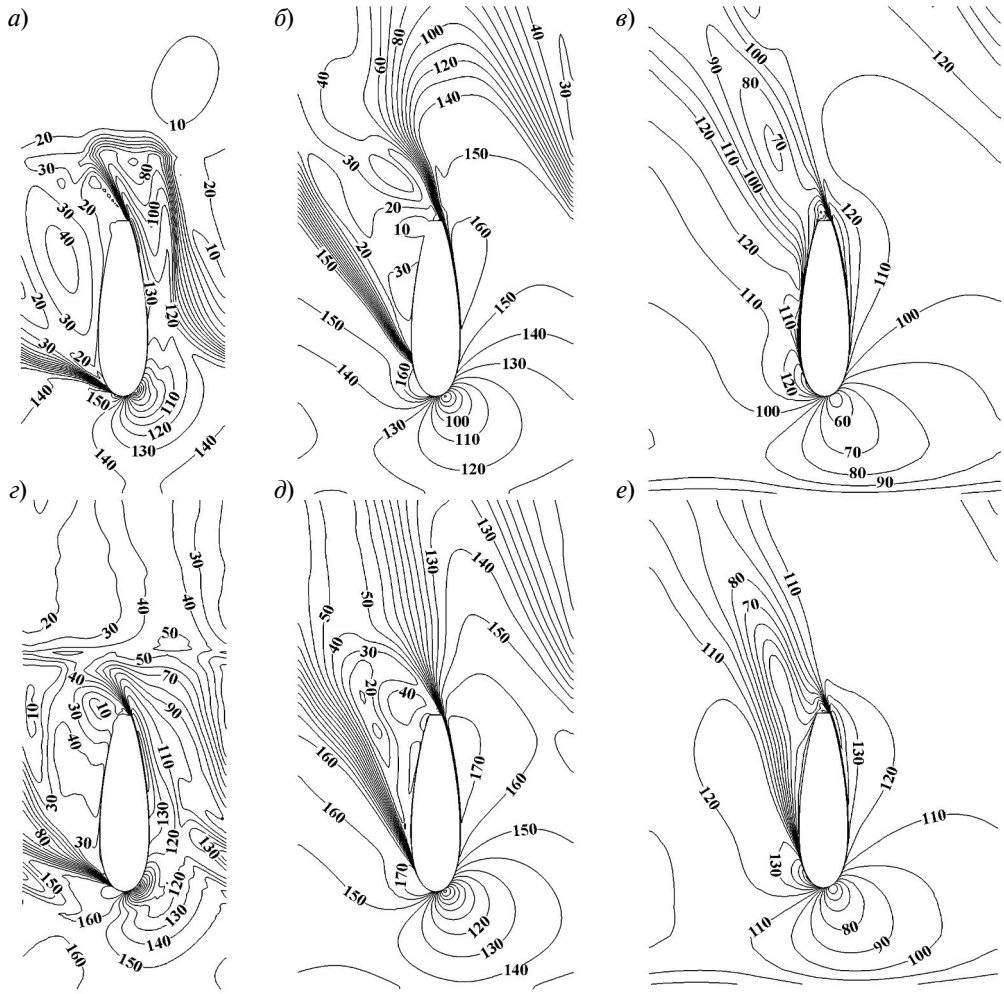

Рис. 6. Распределения осредненного во времени модуля скорости на трех цилиндрических поверхностях по результатам расчетов методами URANS (*а*, *б*, *в*) и IDDES (*г*, *д*, *е*) при R равном 0,126 м (*а*, *г*), 0,171 м (*б*, *д*) и 0,217 м (*в*, *е*)

Как и ожидалось, расчеты по методу IDDES дают намного более детальную вихревую структуру течения, чем вычисления по URANS. Этот факт иллюстрирует рис. 5, где изображена мгновенная изоповерхность так называемого Q-критерия [15] при его значении порядка 10^6 с$^{-2}$. Выбранное высокое положительное значение Q-критерия для построения изоповерхности позволило выделить области с полным преобладанием вращения жидкости над сдвигом, т. е. визуализировать именно вихревую структуру течения.

Различие в качестве разрешения нестационарной вихревой структуры потока методами IDDES и URANS отразилось на полученных расчетных полях скорости (рис. 6). В сечении $R = 0{,}217$ м, близком к внешней обечайке диффузора, где силовые стойки обтекаются с малыми углами атаки и доля потерь, связанных с вихреобразованием, невелика, поля осредненной во времени скорости, полученные методами IDDES и URANS, отличаются незначительно. Однако уже в среднем сечении проточной части диффузора ($R = 0{,}171$ м, угол атаки около 20°) их различие становится очевидным. Наибольшая разница в картинах течения наблюдается в зоне отрывного течения, примыкающей к нижней обечайке диффузора ($R = 0{,}126$ м, угол атаки ≈ 50°).

Различие в структурах течения, предсказанных методами IDDES и URANS, отразилось и на расчетных значениях коэффициента восстановления давления C_p рассматриваемого диффузора. В соответствии с работой [6] эта величина определялась как разница средних значений статического давления на выходе и входе в диффузор, отнесенная к среднему входному динамическому напору. Вычисленные методами URANS и IDDES значения коэффициента C_p составили соответственно 0,56 и 0,65. При этом значение, рассчитанное по методу моделирования отсоединенных вихрей, достаточно близко к экспериментальному значению 0,69 [6] — отличие лежит в пределах 6 %, в то время как метод URANS приводит к расхождению почти в 20 %.

Для расчета трехмерного нестационарного течения в выходном диффузоре газовой турбины даже в том случае, когда силовые стойки обтекаются с умеренными углами атаки, предпочтительно применять метод моделирования отсоединенных вихрей (DES). Этот метод физически более правдоподобно воспроизводит структуру потока, чем нестационарные расчеты на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. Предсказанное методом DES (в его усовершенствованном варианте IDDES) расчетное значение коэффициента восстановления давления в диффузоре удовлетворительно согласуется с экспериментальным.

Можно прогнозировать, что при анализе течения в выходном диффузоре на нерасчетных режимах работы газовой турбины, при которых силовые стойки обтекаются с бóльшими, чем в приведенном в статье примере, углами атаки, преимущества метода IDDES проявятся еще более отчетливо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дейч М.Е., Зарянкин А.Б**. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. М.: Энергия, 1970. 384 с.

2. **Мигай В.К., Гудков Э.И.** Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. Л.: Машиностроение, 1981. 272 с.

3. **Зандер М.С., Черников В.А.** Аэродинамические характеристики блока «ступень — выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2011. № 2. С. 61–68.

4. **Зандер М.С., Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Экспериментальные и численные исследования структуры 3D-потока в отсеке «турбинная ступень осевой диффузор» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2013. № 1. С. 197–203.

5. **Rassochin V.A., Chernikov V.A., Zander M.S., Semakina E.U.** Joint research in experimental aerodynamics of exit diffusers of turbines and stage-diffusers unit performed by the sub-department of turbine engines and plants / St.-Petersburg State Polytechnic University and the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, Leibniz University of Hannover. Polytechnic University Publishing House, 2010. P. 141–156.

6. **Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Информационно-измерительная система аэродинамического стенда для исследований потока в проточной части отсека «ступень — диффузор» и некоторые результаты испытаний на модели мощной газовой турбины // Энергетические машины и установки. 2008, №1. С. 24–34.

7. **Петросов К.В.** Совершенствование выходных диффузоров стационарных газовых турбин на основе

физического эксперимента и численного моделирования. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.12. СПб., 2005. 183 с.

8. ANSYS FLUENT. User's Guide / ANSYS, Inc. Release 14.0.

9. **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer-4. Ed. Hanjalic K., Nagano Y., Tummers M. Begell House Inc., 2003. P. 625–632.

10. **Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л., Спаларт Ф.Р.** Метод моделирования отсоединенных вихрей для расчета отрывных турбулентных течений: предпосылки, основная идея и примеры применения // Научно-технические ведомости Политехнического университета. 2004. № 2 (36). С. 22–33.

11. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: Уч. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. 88 с.

12. **Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K.** A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International Journal of Heat and fluid Flow. 2008. Vol. 29. P. 1638–1649.

13. **Gritskevich M.S., Garbaruk A.V., Schutze J., Menter F.R.** Development of DDES and IDDES Formulations for the $k - \omega$ Shear Stress Transport Model // Flow, Turbulence and Combustion. № 88(3). P. 431–449.

14. **Shur M., Spalart P.R., Strelets M., Travin A.** Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack // Engineering turbulence modelling and experiments – 4 / Ed. W. Rodi and D. Lwurense. Elsevier Ltd., 1999. P. 669–678.

15. **Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P.** Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows // Center for Turbulence Research. Report CTR-S88. 1988. P. 193–208.

REFERENCES

1. **Deych M.Ye., Zaryankin A.B.** Gazodinamika diffuzorov i vykhlopnykh patrubkov turbomashin. M.: Energiya, 1970. 384 s. (rus.)

2. **Migay V.K., Gudkov E.I.** Proyektirovaniye i raschet vykhodnykh diffuzorov turbomashin. L.: Mashinostroyeniye, 1981. 272 s. (rus.)

3. **Zander M.S., Chernikov V.A.** Aerodinamicheskiye kharakteristiki bloka «stupen — vykhodnoy diffuzor» statsionarnoy gazovoy turbiny pri razlichnykh rezhimakh raboty. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2011. № 2. S. 61–68. (rus.)

4. **Zander M.S., Chernikov V.A., Semakina Ye.Yu.** Eksperimentalnyye i chislennyye issledovaniya struktury 3D-potoka v otseke «turbinnaya stupen — osevoy diffuzor». *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2013. № 1. S. 197–203. (rus.)

5. **Rassochin V.A., Chernikov V.A., Zander M.S., Semakina E.U.** Joint research in experimental aerodynamics of exit diffusers of turbines and stage-diffusers unit performed by the sub-department of turbine engines and plants / St.-Petersburg State Polytechnic University and the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, Leibniz University of Hannover. Polytechnic University Publishing House, 2010. P. 141–156.

6. **Chernikov V.A., Semakina Ye.Yu.** Informatsionno-izmeritelnaya sistema aerodinamicheskogo stenda dlya issledovaniy potoka v protochnoy chasti otseka «stupen-diffuzor» i nekotoryye rezultaty ispytaniy na modeli moshchnoy gazovoy turbiny. *Energeticheskiye mashiny i ustanovki*. 2008. №1. S. 24–34. (rus.)

7. **Petrosov K.V.** Sovershenstvovaniye vykhodnykh diffuzorov statsionarnykh gazovykh turbin na osnove fizicheskogo eksperimenta i chislennogo modelirovaniya. Diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.04.12.– Sankt-Peterburg, 2005. 183 s. (rus.)

8. ANSYS FLUENT. User's Guide / ANSYS, Inc. Release 14.0.

9. **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer - 4. Ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House Inc., 2003. P. 625–632.

10. **Strelets M.Kh., Travin A.K., Shur M.L., Spalart F.R.** Metod modelirovaniya otsoyedinennykh vikhrey dlya rascheta otryvnykh turbulentnykh techeniy: predposylki, osnovnaya ideya i primery primeneniya. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti. Politekhnicheskogo universiteta. Sankt-Peterburg. 2004. № 2 (36). S. 22–33. (rus.)

11. **Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L.** Modelirovaniye turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy. Uch. posobiye. SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2012. 88 s. (rus.)

12. **Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K.** A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. *International Journal of Heat and fluid Flow*. 2008. Vol. 29. P. 1638–1649.

13. **Gritskevich M.S., Garbaruk A.V., Schutze J., Menter F.R.** Development of DDES and IDDES Formulations for the $k - \omega$ Shear Stress Transport Model. *Flow, Turbulence and Combustion*. 88(3). P. 431–449.

14. **Shur M., Spalart P.R., Strelets M., Travin A.** Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack // Engineering turbulence modelling and experiments – 4 / Ed. W. Rodi and D. Lwurense. Elsevier Ltd., 1999. P. 669–678.

15. **Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P.** Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows // Center for Turbulence Research. Report CTR-S88. 1988. P. 193–208.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИРИЛЛОВ Александр Иванович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ai_kirillov@mail.ru

ГАЛАЕВ Сергей Александрович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: sealga@mail.ru

ИСУПОВ Василий Юрьевич — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vasiliy.isupov@gmail.com

СМИРНОВ Евгений Михайлович — доктор физико-математических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

AUTHORS

KIRILLOV Aleksandr I. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ai_kirillov@mail.ru

GALAEV Sergei A. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: sealga@mail.ru

ISUPOV Vasilii Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vasiliy.isupov@gmail.com

SMIRNOV Evgenii M. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014