

УДК 621.43.056

Т.В. Степанова, Д.В. Козел

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ МЕТОДАМИ CFD АНАЛИЗА.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОГО АСПЕКТА НА ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧЕ

Исследовано влияние локального разрешения расчетных сеток на точность численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий жаровой трубы камер сгорания газотурбинных двигателей на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха проходящего потока через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду. Для численного моделирования трехмерного турбулентного течения использованы осредненные по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье–Стокса несжимаемой жидкости, замыкаемые моделью турбулентности ШИ. Предложен экономичный метод увеличения точности численных оценок указанного параметра, позволяющий обеспечить сеточное разрешение областей с максимальной кривизной линии тока в районе кромок отверстия.

Камера сгорания, жаровая труба, смесительные отверстия, коэффициент расхода, численное моделирование, расчетные сетки, топология, измельчение, анализ точности

Введение

Одним из условий, необходимых для обеспечения конкурентоспособности отечественных ГТД, является повышение ресурса основных узлов. Для удовлетворения требованиям ресурса камеры сгорания (КС) и турбины необходимо проведение полного комплекса расчетно-экспериментальных работ, включающих в себя оптимизацию распределения воздуха по сечению КС, проектирование системы охлаждения стенок жаровых труб (ЖТ), доводочные работы для обеспечения заданного уровня радиальной и окружной неравномерности поля температур газа на выходе из КС при условии обеспечения других характеристик, таких как полнота сгорания, потери полного давления, запасы по бедному и богатому срыву пламени, характеристики запуска. Степень совершенства температурного поля на выходе из КС является критерием обеспечения ресурса турбины и двигателя в целом. Кроме того, снижение окружной неравномерности позволяет увеличить значение среднемассовой температуры газа перед турбиной и тем самым повысить мощность и КПД газотурбинной установки. Профиль температур должен быть согласован с уровнем напряжения в лопатках турбины, чтобы обеспе-

чить требуемый ресурс работы лопаток. Установлено, что повышение температуры газа в некотором локальном радиальном сечении лопаток турбины всего на 28 °С может уменьшить рабочий ресурс лопаток на 50% или потребовать повышения на 0,5% расхода воздуха для охлаждения турбины, чтобы ресурс остался неизменным. Вместе с тем, увеличение на 1% расхода воздуха на охлаждение турбины снижает взлетную тягу ГТД на 2,25% [1]. Поэтому исследование особенностей и разработка математических моделей формирования полей температуры газа на выходе из существующих КС ГТД представляет значительный научный и практический интерес.

Неравномерность поля температур на выходе из КС определяется большим количеством факторов – неравномерностью полей скоростей воздуха в диффузоре и кольцевых каналах (КК) КС, количеством воздуха, подаваемого в зоны смешения и разбавления, геометрией КС, характеристиками распыла топлива, рабочим режимом и пр. Данные факторы являются взаимовлияющими, что затрудняет оценку вклада каждого из них. Поэтому для решения задачи уменьшения неравномерности поля температур на выходе из КС требуется инструмент, предоставля-

ющий возможность оценить влияние каждого из конструктивных и режимных параметров, а также их возможных сочетаний.

В работе [2] была разработана полуэмпирическая модель формирования поля температур газа на выходе из кольцевых камер сгорания. Построенные авторами эмпирические зависимости дают возможность проводить анализ изменения поля температур в зависимости от распределения смесительного и охлаждающего воздуха, формы зоны разбавления и режима работы КС, что позволяет определить конструктивный облик КС на этапе эскизного проектирования. Дальнейшее повышение точности прогнозирования характеристик КС требует учета характеристик системы топливоподачи – секторной неравномерности, мелкости распыла капель, процессов испарения и выгорания и т.д. В работе [3] показано, что повышение надежности прогнозирования характеристик КС требует перехода к моделированию ее рабочего процесса на микроуровне методами вычислительной аэрогидродинамики. Отметим, что для успешного применения методов вычислительной аэрогидродинамики необходимо выработать методические подходы к построению расчетной сетки, позволяющие обеспечить сеточную независимость получаемого решения, а также сформировать математическую модель, обеспечивающую заданный уровень точности прогнозирования целевых параметров.

Бадерников и Пиралишвили указывают, что особенности конструкций форсуночно-горелочных устройств и охлаждаемых стенок ЖТ современных ГТД таковы, что для их полного моделирования средствами вычислительной газодинамики требуются чрезвычайно большие ресурсы. Согласно оценке авторов [4], для моделирования элементов конструкции КС требуется в «полной» модели приблизительно 100 млн. ячеек на КС, а в предложенной «редуцированной» модели ~ 13 млн. Применение сеток такого размера накладывает серьезные ограничения на внедрение CFD моделирования в процесс проектирования, обусловленные как требованиями к вычислительным ресурсам, так и временными затратами на проведение расчетных работ по оптимизации характеристик КС.

Поэтому актуальной задачей является решение вопроса о необходимом разрешении расчетной сетки, обеспечивающей требуемый уровень точности моделирования гидравлических характеристик КС для прогнозирования неравномерности поля температур на выходе из КС.

В работах [5, 6] было выполнено исследование влияния топологии и разрешения расчетных сеток на точность численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий жаровой трубы камер сгорания газотурбинных двигателей

на основе решения тестовой задачи о течении в трубе с диафрагмой, а также задачи об истечении воздуха проходящего потока через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду. При этом было выполнено исследование влияния количества измельчаемых слоев ячеек, примыкающих к цилиндрической поверхности отверстия, слоев ячеек в области над и под отверстием на точность численных оценок расхода коэффициента отверстия.

Опыт предприятия в проведении расчетно-экспериментальных работ по КС различных типов ГТД указывает на то, что каждая из них обладает отличительными конструктивными особенностями, которые определяют гидравлические характеристики, а также в рамках КС одного типа имеет место индивидуальный локальный характер течения потока в районе каждого ряда отверстий. Поэтому можно предположить, что вышеуказанные особенности требуют более детального размельчения в локальной области больших градиентов параметров потока, определяющих истечение через отверстие, для минимизации сеточных ресурсов и обеспечения потребной точности численных оценок коэффициента расхода. Следовательно, представляется целесообразным развитие и возможное уточнение метода увеличения точности численного расчета указанного параметра, приведенного в [5, 6], путем применения гексаэдральных сеток с иерархическими структурами, при сохранении требований к вычислительным затратам.

Цель настоящей работы состоит в развитии методических приемов построения расчетных сеток в районе смесительных и основных отверстий ЖТ на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха проходящего потока через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду, предложенных в работе [6].

Предмет исследования – зависимость точности численных оценок коэффициента расхода отверстий в тонкой стенке канала при наличии проходящего потока от разрешения и топологии сетки.

1. Методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран размер отверстия в стенке жаровой трубы, характерный для основных и смесительных отверстий КС АИ-222-25 диаметром $D = 9$ мм в стенке толщиной $\ell = 1$ мм.

Исследование проводилось в трехмерной постановке для несжимаемого стационарного течения, моделировавшегося осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса, замыкаемыми моделью турбулентности $k - \varepsilon$ Ши и др. [8] со стандартными функциями стенок.

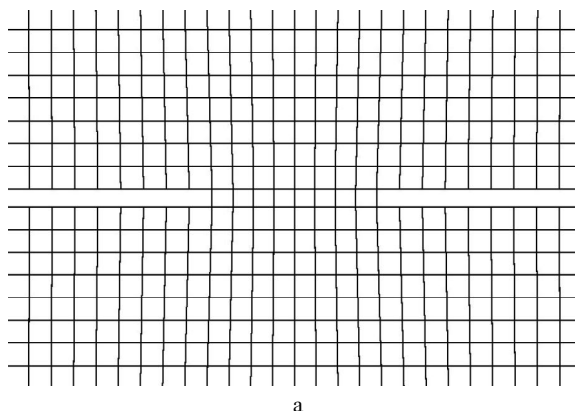
Как и в работе [6], расчетная схема представляла собой плоскую щель, в которую параллельно ее стенкам вставлена плоская пластина толщиной ℓ , перфорированная одним рядом отверстий диаметром D с относительным шагом $z/D = 5,56$. Канал над пластиной относительной высотой $h_{\text{КК}}/D = 1,78$ имитировал КК. Канал под пластиной относительной высотой $h_{\text{ЖТ}}/D = 6,05$ имитировал ЖТ. В силу поступательной периодичности течения в направлении оси z и равенства нулю компоненты скорости V_z в плоскостях периодичности численное решение задачи отыскивалось в области пространства, ограниченной параллелепипедом, грани которого образованы стенками щели, двумя плоскостями yOx , проходящими посередине между отверстиями, и двумя плоскостями zOy , соответствующими входу и выходу из щели.

В качестве граничных условий на входе в КК задавалась скорость с равномерным профилем, температура потока, интенсивность турбулентности 10 % и значение отношения турбулентной вязкости к динамической вязкости равное 10, на выходе из КК ставилось условие постоянства статического давления в поперечном сечении,

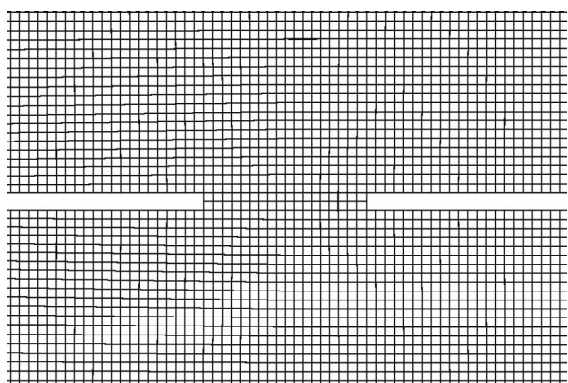
избыточного над давлением в ЖТ. На выходе из ЖТ задавалось нулевое избыточное статическое давление, на входе в ЖТ задавалось граничное условие стенки. Численное интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных осуществлялось итерационно методом контрольного объема с использованием схемы аппроксимации конвективных членов QUICK. Уравнение неразрывности в пределе малых чисел Маха удовлетворялось с помощью процедуры коррекции давления SIMPLE.

На первом этапе исследования расчетная область была покрыта гибридными конформными сетками (рис.1): равномерными гексаэдральными в отверстиях и прилегающих объемах КК и ЖТ, тетраэдральными в областях, моделирующих КК и ЖТ. Сетки №1-5 различались разрешением в районе отверстия (табл. 1), при сохранении размеров и локализации измельченной области.

На втором этапе исследования были выполнены расчеты на сетках с иерархическими структурами в районе отверстия (рис.2), полученных из сеток №1-3 путем их последовательного локального измельчения в районе с максимальной кривизной линий тока в окрестности отверстия.

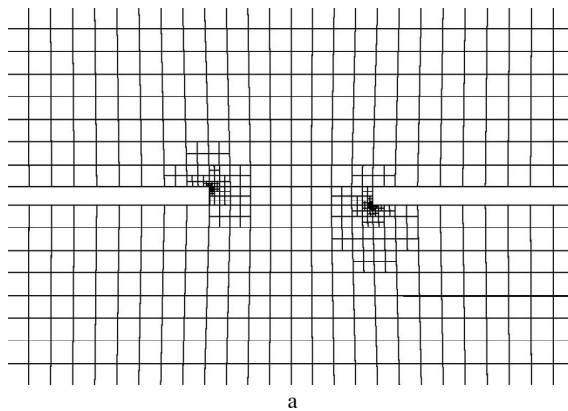


а

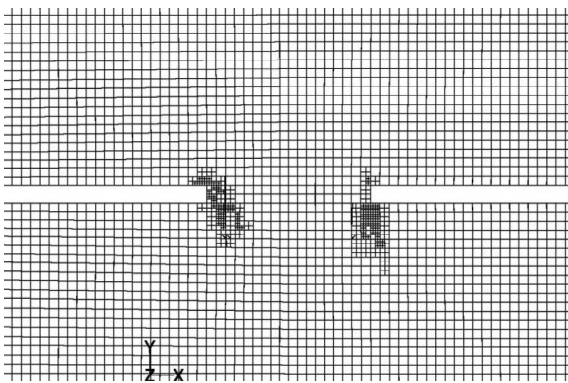


б

Рис. 1. Равномерные гексаэдральные расчетные сетки:
а – сетка № 2; б – сетка № 3



а



б

Рис. 2. Расчетные сетки с иерархическими структурами: а – сетка № 13; б – сетка № 15

Численные оценки коэффициента расхода отверстия определялись по формуле

$$\mu_{\text{ч}} = G \cdot F_0^{-1} \cdot (2 \cdot \rho \cdot \Delta P)^{-0,5}, \quad (1)$$

где G – массовый расход воздуха через отверстие; F_0 – площадь поперечного сечения отверстия; ρ – плотность; ΔP – статическое давление в КК, избыточное над статическим давлением в ЖТ.

Точность численных расчетов оценивалась путем сравнения их результатов с экспериментальными данными, аппроксимированными формулой [7]

$$\mu = 0,6 \cdot \left[1 - (1 + m)^{-(2 \cdot \bar{f}^2 + 2,34 \cdot \bar{f} + 2,22)} \right], \quad (2)$$

где $m = \sqrt{\Delta P / q}$; $q = \rho \cdot V_{\text{КК}}^2 / 2$; \bar{f} – отношение площади поперечного сечения отверстия к площади поперечного сечения КК, приходящейся на одно отверстие; $V_{\text{КК}}$ – скорость в КК.

Относительная погрешность численного расчета определялась по формуле

$$\delta_{\mu} = (\mu_{\text{ч}} - \mu) / \mu \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{ч}}$ и μ – значения коэффициента расхода, вычисленные по формулам (1) и (2) соответственно.

2. Результаты исследования

Численные оценки коэффициента расхода отверстия и их погрешности, полученные на сетках приведены в табл. 1, 2.

Из табл. 1 видно, что в размельчение равномерных гексаэдральных сеток, обеспечивающее увеличение количества ячеек в отверстиях и прилегающих объемах ЖТ и КК, устойчиво снижает погрешность численного расчета коэффициента расхода δ_{μ} – переход от сетки, содержащей 276 ячеек, к сетке с $4 \cdot 10^6$ ячеек снижает погрешность моделирования коэффициента расхода с 12,91% до 4,01%. Для дальнейшего повышения точности численных оценок коэффициента расхода одиночного отверстия требуются чрезвычайно большие вычислительные ресурсы, поэтому данный подход неприменим для моделирования гидравлических характеристик полноразмерной КС.

Из табл. 2 видно, что использование гексаэдральных сеток с иерархическими структурами, построенными путем размельчения в районе с максимальной кривизной линий тока, устойчиво снижает погрешность численного расчета коэффициента расхода – переход от сетки №1, со-

держащей 276 ячеек, к сетке №9 с $1,4 \cdot 10^5$ ячеек снижает погрешность моделирования коэффициента расхода с 12,91% до 0,74%.

Таблица 1

Численные оценки коэффициентов расхода, полученные на различных равномерных сетках, гексаэдральных в районе отверстия

№ сетки	n	n_{ℓ}	n_D	$\mu_{\text{ч}}$	δ_{μ} , %
1	276	1	3	0,700	12,91
2	4476	1	8	0,656	10,65
3	62216	2	18	0,652	9,92
4	506688	4	36	0,647	9,02
5	1474560	6	52	0,628	5,97
6	4098816	8	76	0,617	4,01

Обозначения: n – общее количество ячеек в районе отверстия; n_{ℓ} – количество ячеек, уложенных вдоль толщины стенки

Таблица 2

Численные оценки коэффициентов расхода, полученные на различных сетках с иерархическими структурами в районе отверстия

№ сетки	№ исходной сетки	n	$\mu_{\text{ч}}$	δ_{μ} , %
7	1	26984	0,642	8,22
8	1	191129	0,615	3,66
9	1	1418291	0,598	0,74
10	2	19405	0,637	7,30
11	2	72311	0,623	5,04
12	2	73925	0,627	3,28
13	2	133259	0,609	2,74
14	3	74039	0,635	7,04
15	3	111762	0,624	5,24

Сопоставление результатов расчетов с данными исследования [6] показывает, что применение гексаэдральных сеток с иерархическими структурами, размельченными в районе больших градиентов направления линий тока, позволяет обеспечить большую точность моделирования коэффициента расхода отверстия в тонкой стенке по сравнению с подходом размельчения слоев расчетной сетки в районе отверстия. Так, авторами [6] была достигнута наименьшая погрешность расчета $\delta_{\mu} = 3,7\%$ путем трехкратного измельчения сетки в двух слоях ячеек в области над отверстием и двух слоях ячеек в области под отверстием, при этом прирост количества ячеек в результате измельчения сетки в окрестности одного отверстия составляет 177226, а общее число ячеек в расчетном домене составляет 455240. Расчет на сетке № 12 дает относительную по-

грешность $\delta_{\mu} = 3,28 \%$, при этом потребный прирост количества ячеек в результате измельчения сетки в окрестности одного отверстия составляет 73925.

Т.о. можно сделать вывод, что построенные иерархические структуры, обеспечившие детальное измельчение в локальной области больших градиентов направлений линий тока, дают возможность минимизации сеточных ресурсов при обеспечении высокой точности численных оценок коэффициента расхода.

Заключение

Выполненное исследование влияния топологии и разрешения расчетных сеток на точность численных оценок коэффициентов расхода смесительных отверстий ЖТ на основе решения тестовой задачи об истечении воздуха проходящего потока через ряд отверстий в тонкой стенке канала в неподвижную среду позволило уточнить методические приемы построения расчетных сеток, разработанные в работах [5, 6], и предложить метод увеличения точности численного расчета указанного параметра путем применения гексаэдральных сеток с иерархическими структурами, обеспечивающих детальное измельчение в локальной области больших градиентов направления линий тока. Применение данного подхода позволит обеспечить разумное распределение и использование вычислительных ресурсов для достижения заданной точности моделирования гидравлических характеристик минимальными вычислительными затратами или, что равнозначно, повышение точности расчетов на заданных вычислительных ресурсах.

Направление дальнейших исследований авторы видят в установлении количественных связей между точностью численных оценок гидравлических параметров и точностью численных оценок неравномерности поля температур на выходе из КС.

Перечень ссылок

1. Абрашкин В.Ю. Формирование полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД : дис. канд. техн. наук : 05.07.05 Самара, 2006. 152 с.
2. G. V. Cox, Jr., An Analytical Model for Predicting Exit Temperature Profile from Gas Turbine Engine Annular Combustors, AIAA Paper 75-1307, 1975.
3. Костюк В.Е., Кравченко И.Ф. Анализ современных подходов к прогнозированию пусковых и срывных характеристик камер сгорания ГТД. II. Моделирование на микроуровне // Авиационно-космическая техника и технология. — 2004. — № 7. — С. 59-68.
4. Бадерников А.В., Пиралишвили Ш.А. Разработка редуцированной трехмерной модели камеры сгорания // Авиакосмическое приборостроение. — 2009. № 11. — С. 47-54
5. Костюк В.Е. Оптимальное измельчение сетки для численного расчета коэффициентов расхода и гидравлического сопротивления смесительных отверстий жаровой трубы / В.Е. Костюк, Е.И. Кириладш, В.Н. Гусев // Авиационно-космическая техника и технология. — 2010. — №1. — С. 65-73.
6. Костюк В.Е. Экономичный метод повышения точности численного расчета коэффициентов расхода смесительных отверстий жаровой трубы / Костюк В.Е., Кириладш Е.И., Козел Д.В., Степанова Т.В. // Вестник двигателестроения. — 2010. — № 1. — С. 53-59.
7. Безменов В.Я. Методика гидравлического расчета камер сгорания ГТД на ЭВМ / Безменов В.Я., Бородин А.П., Валеев Р.С. Техн. отчет ЦИАМ № 6759, 1971.
8. Shih T.-H. A New — Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows — Model Development and Validation / T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // Computers Fluids. — 1995. — № 24(3). — P. 227-238.

Поступила в редакцию 01.07.2010 г.

T.V. Stepanova, D.V. Kozel

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL APPROACH TO IMPROVE AERODYNAMIC ACCURACY IN NUMERICAL COMPUTATION TEMPERATURE PATTERN AT COMBUSTOR'S OUTLET

Досліджено вплив локального розділення розрахункових сіток на точність чисельних оцінок коефіцієнтів витрати змішувальних отворів жарової труби камер згорання газотурбінних двигунів на основі рішення тестової задачі про витікання повітря прохідного потоку крізь ряд отворів в тонкій стінці каналу у нерухоме середовище. Для числового моделювання тривимірної турбулентної течії застосовувалися осереднені за Рейнольдсом стаціонарні рівняння Нав'є-Стокса нестисливої рідини, які замикалися моделлю турбулентності Ши. Запропоновано економічний метод підвищення точності чисельних оцінок зазначеного параметра, що дозволяє забезпечити сіткове розділення зон з максимальною кривиною напрямку ліній току в районі крайок отвору.

Камера згоряння, жарова труба, змішувальні отвори, коефіцієнт витрати, числове моделювання, розрахункові сітки, топологія, подрібнення, аналіз точності

The influence of the local resolution of computational grids on the discharge coefficients numerical evaluations accuracy of the gas turbine combustor flame tube mixing orifices is investigated. It is based on the test problem solution of the passing stream's air outflow through an orifice row in the channel thin wall into the stationary environment. Steady Reynolds averaged incompressible Navier – Stokes equations, closed by Shih turbulence model, are used for numerical simulation of three-dimensional turbulent flow. Accuracy enhancement economical method of specified parameter numerical evaluations is suggested. This makes it possible to provide grid resolution of region with maximum gradients of streamlines directions near the edge of the hole.

Combustor, flame tube, mixing orifices, discharge coefficient, numerical simulation, computational grids, topology, refinement, accuracy analysis