

УДК 621.43.056

Е.И. КИРИЛАШ, В.Е. КОСТЮК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДИФFUЗОРНОГО УЧАСТКА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Выполнена аэродинамическая двухкритериальная оптимизация геометрической формы диффузорного участка топливоздушного смесителя каталитической камеры сгорания ГТД, основанная на применении численной модели турбулентного течения и генетического алгоритма поиска глобального оптимума. Для численного моделирования турбулентного течения использованы осредненные по Рейнольдсу стационарные уравнения Навье – Стокса несжимаемой жидкости, замыкаемые эмпирической моделью турбулентности. Из числа полученных эффективных по Парето решений эвристически выбран оптимальный вариант конструкции диффузорного участка.

Ключевые слова: камера сгорания, аэродинамическая оптимизация, генетический алгоритм, численное моделирование, гидравлическое сопротивление, неравномерность поля скорости

Введение

Диффузор камеры сгорания (КС) в значительной мере определяет надежность работы двигателя: он должен тормозить поток на входе в жаровую трубу (ЖТ) с минимальными потерями полного давления, дозировано распределять воздух по всем зонам горения и создавать устойчивое равномерное поле скорости перед ЖТ [1]. Поэтому оптимальное профилирование диффузора является важным направлением совершенствования КС.

Использование современных методов вычислительной аэрогидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics), объединенных с математическими методами решения задач оптимизации, позволяет эффективно решать такие задачи.

1. Формулирование проблемы

Оптимизационные проблемы довольно часто встречаются в аэродинамике.

Наиболее полно эти вопросы разработаны в области лопаточных турбомашин [2]. В последнее время появились работы по оптимизации рабочего процесса КС [3 – 6]; оптимизационные алгоритмы используются для предварительной разработки конструкции КС [7, 8]. Однако работы по аэродинамической оптимизации диффузоров КС практически отсутствуют.

Цель настоящей работы состоит в предварительной отработке алгоритма аэродинамической оптимизации на реальном объекте простой геометрической формы – диффузорном участке каталитической КС ГТД.

2. Процесс оптимизации диффузорного участка КС

Анализ характеристик и оптимизация формы диффузорного участка КС с использованием CFD – это сложная задача, требующая объединения САД систем, генераторов сетки, CFD кодов и инструментов оптимизации.

Прототипом оптимизируемого объекта был диффузорный участок (рис. 1) топливоздушного смесителя каталитической КС ГТУ мощностью 11 МВт фирмы GE [9]. Его приемлемая форма, с прямыми стенками и двойным углом раскрытия, была определена в результате одномерных расчетов, 2D и 3D CFD-исследований. Такой диффузор удовлетворяет требованиям по снижению скорости потока и выравнивания поля скоростей на входе в катализатор.

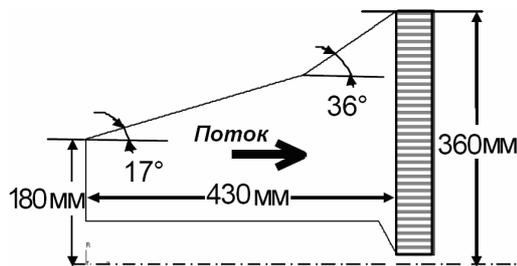


Рис. 1. Диффузорный участок топливоздушного смесителя каталитической КС [9]

В данной работе оба указанные выше требования, предъявляемые к диффузору, сохранены. Специфические требования, обусловленные особенностями каталитической КС, не рассматривались.

Таким образом, задача двухкритериальной

оптимизации геометрической формы диффузора КС заключается в нахождении минимума потерь полного давления и минимума неравномерности поля скорости на выходе из диффузора при ограничениях, накладываемых на изменяемые геометрические параметры.

Цикл оптимизации представляет собой интеграцию методов конструирования, анализа и оптимизации диффузорного участка КС путем непрерывного автоматического взаимодействия между генератором сетки, CFD-кодом и оптимизатором.

На рис. 2 показана схема такой оптимизации.



Рис. 2. Схема оптимизации

Оптимизационный алгоритм модифицирует форму исходного диффузорного участка КС путем изменения входных геометрических параметров. Измененная геометрия диффузора попадает в приложение, генерирующее расчетную сетку. После этого CFD код рассчитывает течение внутри расчетной области. После получения решения находятся значения функций цели с помощью пост-процессинговой программы.

Параметризация формы диффузора. В двухмерной геометрии диффузора была задана одна точка А на образующей конусного участка, имеющая переменные координаты x и y , которые являются параметрами оптимизации (рис. 3). Координата x изменялась в пределах $0 \dots 430$ мм, $y - 180 \dots 360$ мм.

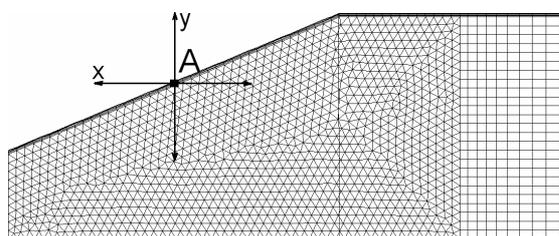


Рис. 3. Объект исследования (исходная конструкция)

Генерация сетки. Расчетная сетка состояла из треугольных ячеек в области диффузора и прямоугольных ячеек на успокоительном участке (рис. 3). Треугольная сетка, в отличие от четырехугольной, вызывает меньше проблем при ее автоматической перестройке в процессе оптимизации [10]. В пристеночной области сетка была выполнена четырех-

угольной для разрешения пограничного слоя (ПС). Среднее количество ячеек в модели около 3,5 тыс.

Математическая модель течения и ее верификация. Для расчета вязкого течения использовалась система дифференциальных уравнений с частными производными (ДУЧП), описывающая законы сохранения массы и количества движения, дополненная моделью турбулентного обмена. Для практического применения наиболее эффективными считаются модели на основе стационарных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу.

Поскольку в исследуемом диффузоре локальные числа Маха невелики ($M < 0,3$), течение можно полагать несжимаемым. Действием силы тяжести и объемной вязкостью пренебрегаем.

При сделанных допущениях уравнения неразрывности и количества движения принимают вид:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (2)$$

где ρ – плотность; u_i – декартовы составляющие вектора средней скорости; x_j, x_i – декартовы координаты; μ – динамическая вязкость; μ_T – турбулентная вязкость; p – статическое давление.

Уравнения (1) и (2) замыкаются уравнениями модели турбулентности $k-\epsilon$ Лаундера – Сполдинга [11], представляющей совокупность ДУЧП переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости ее диссипации ϵ . Турбулентная вязкость μ_T определяется по формуле Колмогорова – Прандтля

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где C_μ – эмпирический коэффициент.

Система ДУЧП (1), (2) и модели турбулентности дополнена соответствующими граничными условиями. Численное интегрирование ДУЧП осуществлялось методом контрольного объема с использованием схемы аппроксимации конвективных членов «против потока» первого порядка точности.

Для верификации математической модели течения была решена тестовая задача о течении в трубе с внезапным расширением поперечного сечения [10]. Было выполнено сравнение результатов численных расчетов коэффициента гидравлического сопротивления с результатами его расчетов по инженерным формулам, обобщающим экспериментальные данные [12]. Расчетный коэффициент гидравлического сопротивления определялся по формуле:

$$\zeta = \frac{p_1^* - p_2^*}{\rho w_1^2 / 2}, \quad (4)$$

где p_1^* и p_2^* – среднemasсовые значения полного давления во входном и выходном сечениях соответственно; w_1 – среднemasсовая скорость во входном сечении. Результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Расчет течения воздуха в диффузорном участке КС выполнен с использованием верифицированной математической модели. В силу осевой симметрии течения в состав расчетной области включена половина объекта исследования.

Функции цели. Были заданы две функции цели: потери полного давления и неравномерность поля скорости на выходе из диффузора.

Потери полного давления определялись по формуле:

$$\delta P = \frac{P_{\text{вх}}^* - P_{\text{вых}}^*}{P_{\text{вх}}^*} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $P_{\text{вх}}^*$, $P_{\text{вых}}^*$ – полные среднemasсовые давления на входе и выходе из диффузора соответственно.

Неравномерность поля скорости на выходе из диффузора определялась по формуле:

$$W = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n ([V]_i - [V]_{\text{cp}})^2}}{[V]_{\text{cp}}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $[V]_i$ – значение скорости на грани i -ой ячейки, принадлежащей выходному сечению; $[V]_{\text{cp}}$ – среднemasсовое значение скорости в выходном сечении; n – количество граней расчетных ячеек, принадлежащих выходному сечению.

Алгоритм оптимизации. В качестве алгоритма оптимизации использован генетический алгоритм (ГА), который является математической моделью эволюционного процесса, основанного на механизмах естественного отбора и наследования [13]. Алгоритм оперирует последовательностями двоичных чисел (нулей и единиц), называемых хромосомами, имитируя эволюционные процессы в поколениях таких хромосом.

Элементарный ГА состоит из следующих шагов:

- 1) инициализация, или выбор исходной популяции хромосом;
- 2) оценка приспособленности хромосом в популяции;
- 3) селекция хромосом;
- 4) применение генетических операторов;
- 5) формирование новой популяции;
- 6) выбор наилучшей хромосомы.

В классическом ГА применяются два основных генетических оператора: оператор скрещивания (кроссовер) и оператор мутации. Кроссовер – оператор, который формирует хромосому потомка, собирая ее из фрагментов родительских хромосом. Мутация – оператор, вносящий изменения в структуру копии родительской хромосомы, меняя с определенной вероятностью значения отдельных генов на противоположные.

В данной работе использован алгоритм MOGA-II (Multi-objective genetic algorithm) – многоцелевой ГА, являющийся улучшенной версией MOGA Полони [14]. Он использует интеллектуальный мультипоисковый элитизм для обеспечения робастности и направленный кроссовер для ускорения сходимости. Элитизм является очень важным принципом в многоцелевой оптимизации, так как он помогает сохранить особей, находящихся вблизи границы Парето и имеющих наилучший разброс.

MOGA-II был запущен на выполнение с популяцией, содержащей 20 начальных конструкций, эволюционирующей 100 поколений. Начальная популяция была получена по методу Соболя [15], способствующего ускорению сходимости многоцелевых ГА [16].

Получаемый тип последовательности называется квазислучайным. В нем точки максимально удалены друг от друга, таким образом начальная популяция равномерно заполняет пространство конструкций.

3. Результаты двухкритериальной оптимизации диффузорного участка КС

На рис. 4 и в табл. 1 приведены результаты двухкритериальной оптимизации диффузорного участка КС.

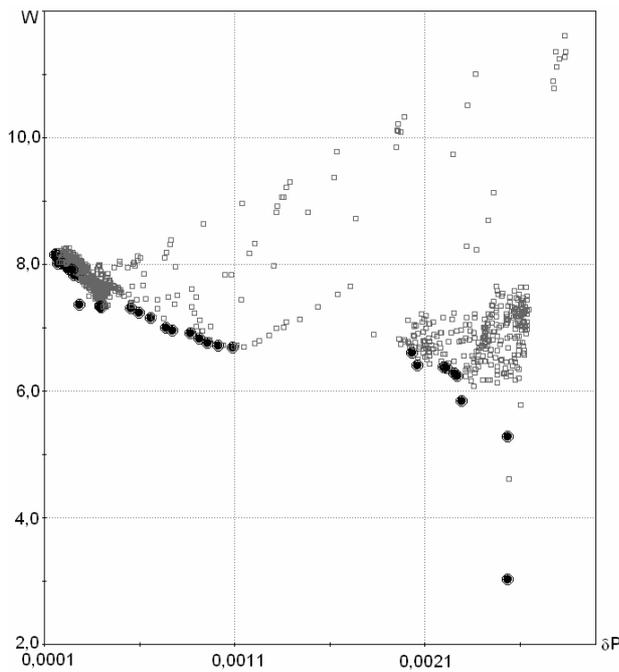


Рис. 4. Результаты оптимизации: □ – расчетные варианты конструкций; ● – варианты конструкций, оптимальные по Парето

Как видно из рис. 4, алгоритм сгенерировал две подобласти расчетных точек: одну – обеспечиваю-

щую минимальные потери; вторую – дающую более равномерный профиль скорости на выходе из диффузора. Так как одновременно оптимизировались две функции цели, то невозможно получить однозначное решение. Наилучшие решения многокритериальной задачи следует искать среди множества Парето [17].

Оптимальность по Парето полагает оптимальным такое решение, при котором любое улучшение одной функции цели может быть достигнуто лишь за счет ухудшения другой. Среди набора эффективных решений окончательный выбор оптимального варианта производится эвристически.

Из числа эффективных решений для дальнейшего рассмотрения было выбрано четыре варианта конструкций (табл. 1): обеспечивающая минимальные потери полного давления (№3), обеспечивающая минимальную неравномерность поля скорости на выходе из диффузора (№1), и два промежуточных варианта (№ 2 и № 4).

В ступенчатом диффузоре (№3), в котором после плавного изменения площади поперечного сечения имеется внезапное расширение, основные потери (потери на удар) происходят уже при сравнительно малых скоростях. Вследствие этого потери в диффузоре значительно снижаются [12].

Таблица 1

Результаты двухкритериальной оптимизации диффузорного участка КС

Вариант-конструкции	Расчетные линии тока	Координаты точки А: x; y (мм)	Потери полного давления δP , %	Неравномерность поля скорости W, %
Исходная		215; 270	0,0367	7,62
GE		315; 276	0,0298	7,96
№1		85; 180	0,1088	6,69
№2		95; 190	0,0597	7,24
№3		430; 265	0,0167	8,15
№4		415; 320	0,0287	7,36

В диффузоре с ростом площади поперечного сечения средняя скорость потока при увеличении угла расширения α падает, общие потери давления

диффузора также уменьшается до определенных значений α . Начиная с некоторого угла расширения диффузора заданной длины, дальнейшее увеличение

этого угла значительно повышает величину потерь. Это вызвано усилением турбулентного перемешивания потока, отрывом ПС от стенок диффузора и связанным с этим сильным вихреобразованием. ПС отрывается от стенок под воздействием положительного градиента давления вдоль диффузора, возникающего вследствие падения скорости при увеличении поперечного сечения.

Наличие прямой проставки перед диффузорным участком (вариант №1) турбулизирует и одновременно утолщает ПС на входе в диффузор, что приводит к увеличению потерь полного давления. С другой стороны, прямая проставка перед диффузором создает на входе в него симметричный профиль скорости с максимумом в центре и пониженными скоростями у стенок. В последующих сечениях за начальным участком профиль скорости становится более выровненным вследствие интенсификации турбулентного перемешивания потока. Из-за особенности геометрии зона вихреобразования имеет меньшие размеры, чем в остальных конструкциях, что позволяет профилю скорости выравниваться быстрее и в большей степени.

Из табл. 1 видно, что оптимальной конструкцией может быть признан вариант №4, обеспечивающий меньшие значения потерь полного давления и неравномерности поля скорости на выходе из диффузора по сравнению как с исходной конструкцией, так и с реальным прототипом. Отличие конструкции прототипа от признанной эвристически оптимальной может объясняться наличием специфических требований (постановкой дополнительных функций цели), предъявляемых к топливоздушному смесителю каталитической КС (достаточное смешение топлива и воздуха, устойчивость к проскоку пламени, снижение скорости непосредственно у поверхности катализатора), которые в данной работе не рассматривались.

Заключение

Успешно выполнена аэродинамическая двухкритериальная оптимизация диффузорного участка топливоздушного смесителя каталитической КС, основанная на генетическом алгоритме MOGA-II. Эвристически признан оптимальным вариант № 4 конструкции диффузорного участка. Данный вариант обеспечил уменьшение потерь полного давления на 22 % и уменьшение неравномерности поля скорости на выходе из диффузора на 3,4 % по сравнению с исходным вариантом конструкции или на 3,7 % и 7,5 % соответственно по сравнению с реальным прототипом. Опробованный алгоритм оптимизации целесообразно использовать при проектировании диффузоров КС.

Литература

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин: монография / А.В. Бойко, Ю.Н. Говоруценко, С.В. Еришов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
3. *Mixing Zone Optimization of a RQL Combustor* / C. Blomeyer [et al] // *Journal of Propulsion and Power*. – 1999. – Vol. 15, № 2 (March/April). – P. 288-295.
4. *Multiobjective evolutionary algorithm for the optimization of noisy combustion processes* / D. Buche, P. Stoll, R. Dornberger, P. Koumoutsakos // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C*. – 2002. – № 32 (4). – P. 460-473.
5. *Paschereit C.O. Combustion process optimization using evolutionary algorithm* / C.O. Paschereit, B. Schuermans, D. Buche // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003*. – Atlanta. June 16-19, 2003 (GT2003-38393). – 11 p.
6. *Optimization of a small aircraft combustor to reduce NOx emissions under practical conditions* / M. Makida, H. Yamada, K. Shimodaira, T. Yamamoto, S. Hayashi // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2007*. – Montreal. May 14-17, 2007 (GT2007-27969). – 8 p.
7. *Despierre A. Gas turbine combustor design using genetic algorithms* / A. Despierre, P.J. Stuttaford, P.A. Rubini // *Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition*. – Orlando. June 2-5, 1997 (ASME Paper 97-GT-72). – 10 p.
8. *Stuttford P. J. Preliminary Gas Turbine Combustor Design Using a Network Approach* / P. J. Stuttford, P. A. Rubini // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Transactions of the ASME*. – 1997. – Vol. 119. – P. 546 – 552.
9. *Development of a Fuel and Air Mixer For an 11 MW Gas Turbine Catalytic Combustion System* / R.. Corr, T. Caron, J. Barnes, T. Howell, P. Dodge // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002*. – Amsterdam. June 3-6, 2002 (GT-2002-30098). – 9 p.
10. Костюк В.Е. Выбор сетки и модели турбулентности для аэродинамической оптимизации отрывного диффузора камеры сгорания ГТД / В.Е. Костюк, Е.И. Кирилай // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 90-94.
11. *Lauder B.E. The Numerical Computation of Turbulent Flows* / B.E. Launder, D.B. Spalding // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974.
12. *Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям* / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
13. *Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности* / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А.Сергеев. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.
14. *Poloni C. GA coupled with computationally expensive simulations: tools to improve efficiency* /

C. Poloni, V. Pediroda // *Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science*. – 1997. – P. 267 – 288.

15. Sobol I.M. *On the Systematic Search in a Hypercube* / I.M. Sobol // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1979. – Vol. 16, № 5 (October). – P. 790 – 793.

16. Poles S. *The Effect of Initial Population Sam-*

pling on the Convergence of Multi-Objective Genetic Algorithms / S. Poles, Y. Fu, E. Rigoni // *MOPGP*. – Loire Valley. June, 2006. – 15 p.

17. Подиновский В.В. *Парето-оптимальные решения многокритериальных задач* / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.

Поступила в редакцию 30.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АЕРОДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДИФУЗОРНОЇ ДІЛЯНКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД

О.І. Кирилаш, В.Є. Костюк

Виконано аеродинамічну двукритерійну оптимізацію геометричної форми дифузорної ділянки паливоповітряного змішувача каталітичної камери згоряння ГТД, яка базується на використанні числової моделі турбулентної течії і генетичного алгоритму пошуку глобального оптимума. Для числового моделювання турбулентної течії застосовувались осереднені за Рейнольдсом стаціонарні рівняння Нав'є – Стокса нестисливої рідини, які замикалися емпіричною моделлю турбулентності. З числа отриманих ефективних за Парето рішень евристично вибрано оптимальний варіант конструкції дифузорної ділянки.

Ключові слова: камера згоряння, аеродинамічна оптимізація, генетичний алгоритм, числове моделювання, гідравлічний опір, нерівномірність поля швидкості.

AERODYNAMICAL OPTIMIZATION OF THE GAS TURBINE COMBUSTOR DIFFUSER SECTION

E.I. Kirilash, V.E. Kostyuk

The aerodynamical twocriterion optimization of the gas turbine catalytic combustor air-fuel mixer diffuser section geometrical shape is performed. It is based on the use of the turbulent flow numerical model and the search global optimum genetic algorithm. Steady Reynolds averaged incompressible Navier – Stokes equations, closed by empirical turbulence model, are used for numerical simulation of turbulent flow. Diffuser section design optimum alternative is chosen heuristically among Pareto effective solutions.

Key words: combustor, aerodynamical optimization, genetic algorithm, numeric simulation, flow resistance, velocity field nonuniformity.

Кирилаш Елена Ивановна – аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

Костюк Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.