

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ремчуков С.С.* , Данилов М.А.** , Чистов К.А.***

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова,
ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия*

** e-mail: remchukov.sviatoslav@yandex.ru*

*** e-mail: danilovma@mail.ru*

**** e-mail: evander2010@yandex.ru*

Представлен расчетный комплекс, позволяющий проводить автоматизированное проектирование и расчет компактного теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя. Разработанный расчетный комплекс позволяет осуществлять доводку теплообменника в автоматическом режиме с минимальными затратами временных ресурсов. В результате расчета и проектирования строятся 3D-модели теплообменника, определяются основные параметры полученного теплообменника, такие как степень регенерации, гидравлические потери и другие. Разработка применима для пластин различных конфигураций при наличии параметризованных 3D-моделей пластин. Автоматизация алгоритма проектирования и расчета позволяет использовать его совместно с автоматизированными программными комплексами многокритериальной оптимизации.

Ключевые слова: малоразмерный газотурбинный двигатель, пластинчатый теплообменник, параметрическое проектирование.

Введение

Расход топлива газотурбинного двигателя (ГТД) может быть снижен двумя способами: за счет повышения параметров рабочего процесса π_k^* и T_T^* и путем перехода на сложный регенеративный цикл, при котором часть энергии выхлопных газов возвращается обратно в цикл посредством специальных устройств.

Повышение параметров цикла π_k^* и T_T^* приводит к снижению и так небольшого для малоразмерного ГТД расхода воздуха и, как следствие, к уменьшению размеров лопаточных машин (компрессора и турбины) [1]. Растущие при этом относительные потери при обтекании втулочной части и зазоров на периферии лопаток снижают эффективность компрессора и турбины, делая дальнейшее повышение параметров цикла бессмысленным (по КПД) и дорогим в изготовлении.

Дальнейшее повышение эффективности ГТД за счет конструктивно-технологического (механические потери) и газодинамического (КПД компрессора, камеры сгорания и турбины) совершенство-

вания проточной части незначительно, так как современные конструкции уже отработаны на техническом и технологическом пределе существующего производства. Дальнейшее совершенствование конструкции приводит к значительному удорожанию производства при небольшом повышении эффективности изделия.

Остается еще один путь повышения эффективности ГТД без значительного изменения конструкции и при достигнутых параметрах цикла: переход к сложной термодинамической схеме с использованием регенерации тепла [2].

Практически это возможно за счет применения теплообменного аппарата (теплообменника), в котором воздух из-за компрессора дополнительно подогревается выхлопными газами, и таким образом часть энергии выхлопных газов возвращается в цикл, снижается количество дополнительной энергии, необходимой для поддержания рабочего режима двигателя, соответственно снижается расход топлива.

В настоящее время теплообменники (ТО) широко применяются в ГТД наземного применения (газотурбинных установках (ГТУ) различного на-

значения: наземный и морской транспорт, мобильные энергоустановки) [3]. Актуальны они и в авиации, особенно в силовых установках беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета. Но для авиации необходимы компактные, высокоэффективные, надежные теплообменники, иначе пропадет весь эффект от экономии топлива. Задача создания таких теплообменников очень актуальна.

Наиболее распространенными являются трубчатые [4] и пластинчатые [5, 6] теплообменники. Данная работа посвящена пластинчатому теплообменнику.

При проектировании пластинчатого теплообменника важной задачей является выбор оптимальной геометрии пластины, которая бы обеспечивала требуемые теплогидравлические характеристики [7, 8]. Следует отметить, что оптимальная конфигурация пластины индивидуальна для каждой задачи. Кроме того, определяющее значение имеет характер взаимного течения рабочих жидкостей [9], но это требование обеспечивается компоновкой теплообменника на двигателе.

По данной тематике проводилось немало исследований [7–12], однако их результаты не позволяют получить оптимальную геометрию поверхности теплообмена при малых затратах времени. В связи с

параметры, полученные из характеристик ГТУ, для которой необходимо разработать теплообменник, представлены в табл. 2.

Расчетный комплекс включает в себя ряд блоков, основанных на открытых коммерческих программах. Блоки объединены общим программным алгоритмом, разработанным в ЦИАМ им. П.И. Баранова. Возможна замена некоторых блоков алгоритма другими, выполняющими аналогичную задачу, при условии сохранения формата и структуры ввода и вывода данных.

Разработанный алгоритм, помимо объединения коммерческих программ, также осуществляет связь и передачу данных между ними. Внутри каждого блока выполняется определенный набор команд. Автономность работы отдельных блоков обеспечивает автоматизацию всего расчетного комплекса.

Работа расчетного комплекса основана на итерационном подходе. На каждой итерации осуществляется изменение входных данных, направленное на получение требуемых параметров: степени регенерации и гидравлического сопротивления.

Автоматизированное проектирование и расчет состоят из следующих этапов (рис. 1):

— ввод исходных данных в параметрическую модель и проверка соответствия ограничениям (MS Excel);

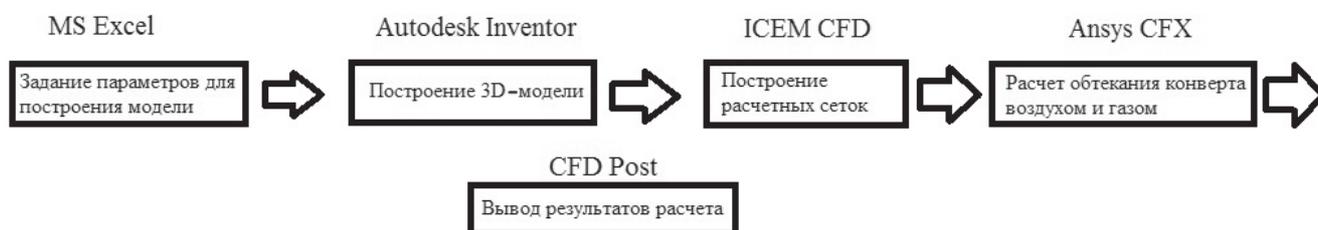


Рис. 1. Структура комплекса проектирования и расчета теплообменника

этим цель работы — создание расчетного комплекса, осуществляющего проектирование и расчет компактного теплообменника в автоматическом режиме.

Описание расчетного комплекса

Расчетный комплекс разработан для одного конверта матрицы, состоящего из двух сопряженных пластин. Такое упрощение позволяет сократить время расчета. В дальнейшем полная матрица теплообменника составляется из определенного количества конвертов, в зависимости от требуемых параметров и исходных данных. Исходными данными для проектирования и расчета теплообменника являются: давление и температура воздуха и газа на входе в теплообменник, расходы воздуха и газа. Эти

— автоматическое построение параметрической модели (Autodesk Inventor);

— подготовка сеточных моделей пластины, воздуха и газа (ICEM CFD);

— расчет обтекания конверта воздухом и газом (Ansys CFX);

— вывод результатов расчетов (CFD Post).

Задание параметров для построения модели

В качестве исходных данных следует рассматривать габаритные размеры теплообменника, геометрию рисунка профиля, толщину ленты, которые задаются в связи с конкретными требованиями, предъявляемыми к двигателю.

Еще один задаваемый параметр, ограниченный технологическими возможностями, — глубина вытяжки. Увеличение глубины вытяжки приводит к росту степени регенерации и гидравлических потерь. Согласно экспериментальным данным, представленным в справочнике по холодной штамповке [13], целесообразно глубину вытяжки ограничить значением 2 мм.

Геометрические параметры исходной модели выбираются согласно рекомендациям литературы, содержащей данные по теплогидравлическим характеристикам поверхностей теплообмена [14—17]. В этой модели используются геометрические параметры исходной пластины (табл. 1), обеспечивающие высокую интенсивность теплообмена и приемлемый уровень гидравлических потерь.

Построение 3D-модели

В работе проводилась оптимизация пластины теплообменника типа «набивки Френкеля» (рис. 2).

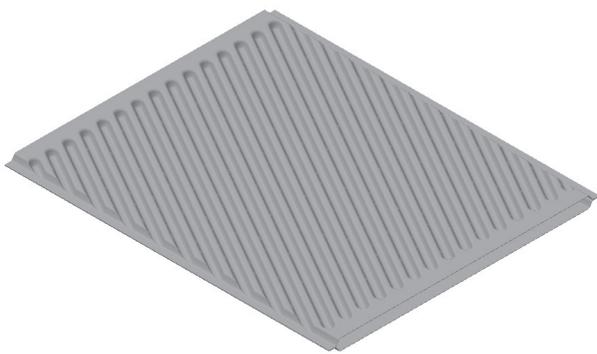


Рис. 2. Объект оптимизации — конверт из двух пластин теплообменника

По заданным параметрам выполняется автоматическое построение модели пластины. Помимо этого, генерируются модели воздуха и газа (рис. 3),

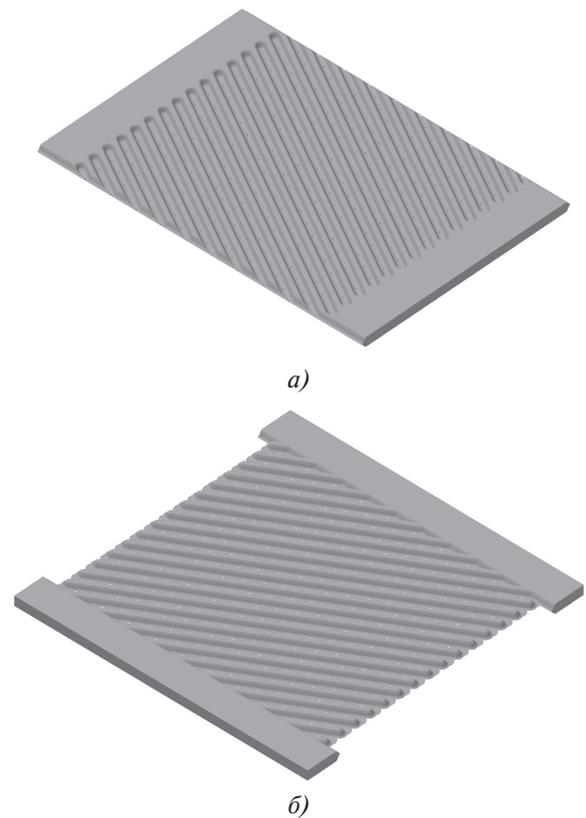


Рис. 3. Модели воздуха (а) и газа (б) в конверте ТО

обтекающие пластину, которые будут использоваться на следующих этапах [18].

Для формирования модели используется 22 геометрических параметра, представленных в табл. 1, полностью определяющих геометрию пластины. Часть параметров имеет возможность варьирования в пределах установленных ограничений, в том числе технологических.

На рис. 4 представлены основные варьируемые геометрические параметры пластины, перечисленные в табл. 1.

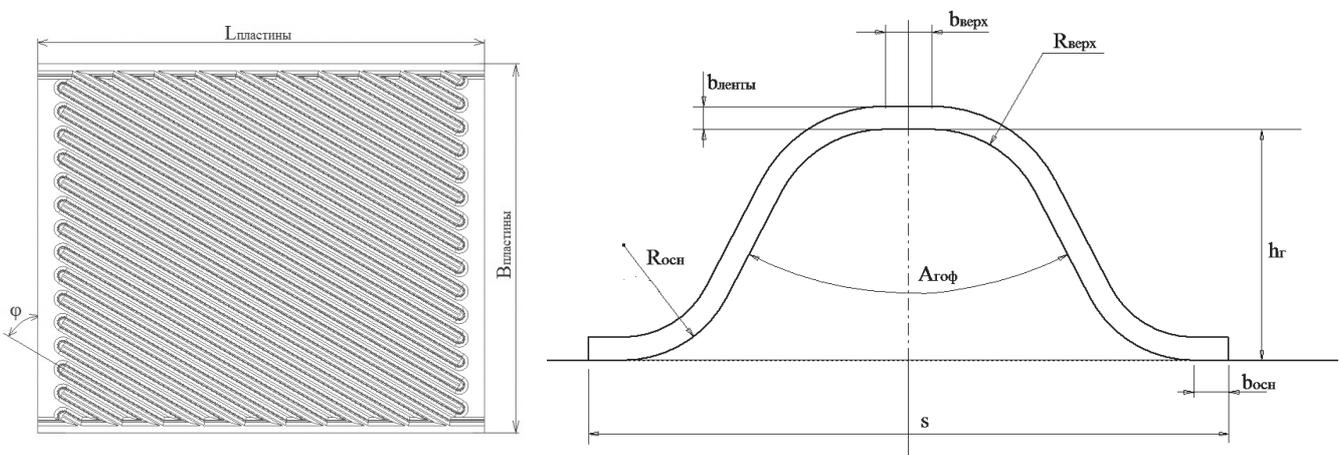


Рис. 4. Основные варьируемые геометрические параметры пластины

Таблица 1

Геометрические параметры модели

№	Наименование параметра	Обозначение параметра	Исходное значение	Ограничения
1	Высота профиля гофра	h_T	2 мм	$1 \text{ мм} \leq h_T \leq 2 \text{ мм}$
2	Толщина ленты	$b_{\text{ленты}}$	0,2 мм	$0,1 \text{ мм} \leq b_{\text{ленты}} \leq 0,4 \text{ мм}$
3	Длина пластины	$L_{\text{пластины}}$	120 мм	$60 \text{ мм} \leq L_{\text{пластины}} \leq 200 \text{ мм}$
4	Ширина пластины	$B_{\text{пластины}}$	100 мм	$60 \text{ мм} \leq B_{\text{пластины}} \leq 200 \text{ мм}$
5	Угол наклона гофров пластины	φ	60°	$20^\circ \leq \varphi \leq 70^\circ$
6	Шаг гофров	s	5,56 мм	$5,5 \text{ мм} \leq s \leq 7 \text{ мм}$
7	Ширина верхней полки профиля	$b_{\text{верх}}$	0,4 мм	—
8	Ширина нижней полки профиля	$b_{\text{осн}}$	0,3 мм	—
9	Угол схождения гофра	$A_{\text{гоф}}$	48°	—
10	Радиус сопряжения верха профиля гофра	$R_{\text{верх}}$	1 мм	$0,5 \text{ мм} \leq R_{\text{верх}} \leq 1 \text{ мм}$
11	Радиус сопряжения основания профиля гофра	$R_{\text{осн}}$	1 мм	$0,5 \text{ мм} \leq R_{\text{осн}} \leq 1 \text{ мм}$
12	Ширина плоского участка сварочной полки	$B_{\text{полки}}$	2 мм	—
13	Угол наклона грани сварочной полки	$A_{\text{полки}}$	60°	—
14	Радиус сопряжения переходной грани у полки	R_1	1 мм	$0,5 \text{ мм} \leq R_1 \leq 1 \text{ мм}$
15	Радиус сопряжения переходной грани у основания	R_2	1 мм	$0,5 \text{ мм} \leq R_2 \leq 1 \text{ мм}$
16	Отступ края гофров от входной кромки	$b_{\text{хт}}$	1,25 мм	—
17	Величина углубления штампа	$H_{\text{шт}}$	0,1 мм	—
18	Коэффициент утонения плоского участка	$K_{\text{шт1}}$	0,9	—
19	Коэффициент утонения наклонного участка	$K_{\text{шт2}}$	0,65	—
20	Толщина плиты штампа	$L_{\text{шт0}}$	37 мм	—
21	Ширина зазора матрица-пуансон	$B_{\text{зазора}}$	0,1 мм	—
22	Отступ для формирования подвода воздуха-газа	H_{01}	10 мм	—

Построение расчетных сеток

Полученные 3D-модели направляются в программу ICEM CFD, где происходит построение расчетных сеток в автоматическом режиме. При построении сеточных моделей используется тетраэдрический тип элементов с достаточно мелким дроблением. Качество построенной сетки можно оценивать параметром y^+ , характеризующим пограничный слой. Размер элементов позволяет получить

значения безразмерных коэффициентов y^+ менее 5, что является достаточным при модели турбулентности Shear Stress Transport (SST).

Расчет теплообменника

Полученные сеточные модели используются для проведения расчета теплообменника (ТО). В качестве граничных условий устанавливаются полные давления и температуры воздуха и газа на входе, а также расходы воздуха и газа на выходе (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета компактного теплообменника

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Температура воздуха на входе в ТО	$T_{в.вх}^*$	К	355
Температура газа на входе в ТО	$T_{г.вх}^*$	К	913
Давление воздуха на входе в ТО	$p_{в.вх}^*$	Па	149000
Давление газа на входе в ТО	$p_{г.вх}^*$	Па	102000
Расход воздуха	G_B	кг/с	0,065
Расход газа	G_G	кг/с	0,070
Длина/ширина/высота модуля	$L/B/H$	мм	120/100/220
Число пластин	n	—	100
Высота пластины	t	мм	2,2
Угол наклона гофров	φ	град	60
Шаг гофров	s	мм	5,56
Степень регенерации	η_p	%	61,85
Суммарные потери	$\Delta P_{сумм}$	%	2,03

В связи с тем, что трехмерный расчет в пакете Ansys CFX [19] проводится для одного конверта, используется условие периодичности газа (для полного обтекания пластин конверта воздухом и газом со всех сторон). Используемая модель турбулентности — SST (перенос сдвиговых напряжений) [20].

Выбор программного пакета Ansys и условий решения газодинамической задачи обусловлен широким применением данного средства моделирования в инженерной практике и большим переч-

нем публикаций решения и верификации результатов.

Вывод результатов расчета

По окончании расчета формируется результирующий файл, содержащий все значимые расчетные параметры теплообменника, характеризующие эффективность варианта теплообменника. Наиболее важные параметры выводятся в табличном виде из CFD Post, что обеспечивает возможность проведения дальнейших операций в автоматизированном режиме. На рис. 5 представлен результат расчета распределения температуры воздуха в конверте.

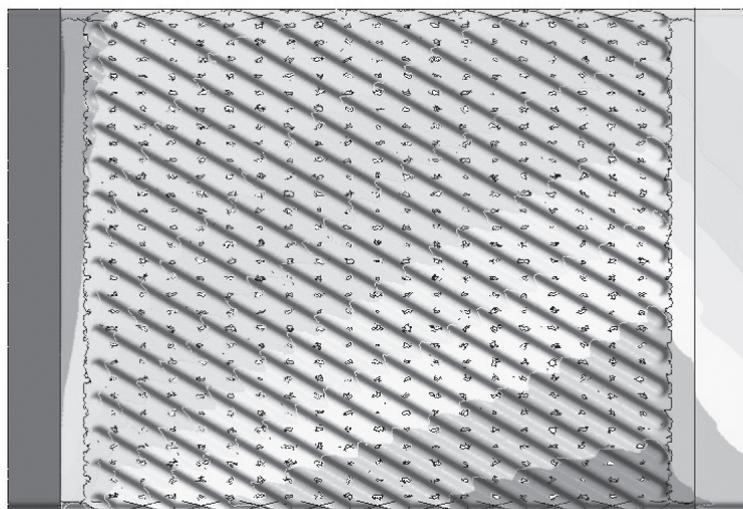
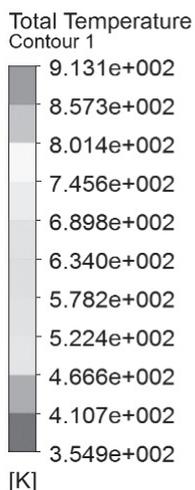


Рис. 5. Распределение температуры воздуха в конверте теплообменника

Корректировка параметров

В случае несоответствия полученных параметров заявленным требованиям осуществляется корректировка параметров с последующим повторением рассмотренного алгоритма.

Для того чтобы минимизировать участие проектировщика и на этой стадии, могут быть использованы программы многокритериальной оптимизации.

Апробация расчетного комплекса

Рассматриваемый расчетный комплекс применялся при проектировании пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя, разрабатываемого в ЦИАМ. В табл. 2 представлены исходные данные и результаты расчета компактного теплообменника.

С помощью расчетного комплекса была проведена доводка конверта в пределах установленных ранее ограничений (см. табл. 1), которая позволила получить лучшие теплогидравлические характеристики.

В табл. 3 представлены параметры конверта теплообменника, полученные при проведении оптимизации с помощью расчетного комплекса. Полученная конфигурация является оптимальной по степени регенерации и обеспечивает при этом меньшие гидравлические потери. В качестве метода оптимизации применялся генетический алгоритм.

Выводы

1. Разработанный программный комплекс позволяет осуществлять проектирование и комплек-

сний многодисциплинарный расчет компактных теплообменников в автоматическом режиме.

2. По модели пластины формируется комплекс технологической оснастки (формообразующие элементы штампа), что позволяет получить комплект конструкторской и технологической документации на изделие в автоматическом режиме.

3. Автоматизация работы программного комплекса позволяет использовать средства многокритериальной оптимизации на этапе корректировки исходных данных.

4. Расчетный комплекс позволил произвести доводку конверта теплообменника, что привело к росту степени регенерации более 76% при снижении гидравлических потерь до 1,27% и при соблюдении требований и ограничений.

5. Разработанный расчетный комплекс позволяет найти оптимальную конфигурацию теплообменника для конкретной задачи в пределах заданных ограничений.

Библиографический список

1. Ланский А.М., Лукачев С.В., Коломзаров О.В. Тенденции изменения геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 47-57.
2. Шмагин К.И., Попова Т.В., Ломазов В.С., Осипов И.В., Тимофеев В.В., Данилов М.А., Князев А.Н. Малоразмерный газотурбинный двигатель с регенерацией тепла. Патент № 2563079 С1. Бюлл. №26, 20.09.2015.

Таблица 3

Результаты проведения оптимизации конверта теплообменника с помощью расчетного комплекса

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Температура воздуха на входе в ТО	$T_{в.вх}^*$	К	355
Температура газа на входе в ТО	$T_{г.вх}^*$	К	913
Давление воздуха на входе в ТО	$p_{в.вх}^*$	Па	149000
Давление газа на входе в ТО	$p_{г.вх}^*$	Па	102000
Расход воздуха	G_B	кг/с	0,065
Расход газа	G_G	кг/с	0,070
Длина/ширина/высота модуля	$L/B/H$	мм	200/172/220
Число пластин	n	-	100
Высота пластины	t	мм	2,2
Угол наклона гофров	φ	град	49,63
Шаг гофров	s	мм	5,81
Степень регенерации	η_p	%	76,61
Суммарные потери	$\Delta P_{сумм}$	%	1,27

3. Дрейцер Г.А. Компактные теплообменные аппараты: Учеб. пособие. — М.: МАИ, 1986. — 73 с.
4. Кожухотрубный (кожухотрубчатый) теплообменник. Устройство и принцип работы, <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>
5. Пластинчатый теплообменник. Устройство и принцип работы, <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-phe/>
6. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. — М.: Машиностроение, 1973. — 288 с.
7. Антупьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. — М.; Л.: Энергия, 1966. — 184 с.
8. Егоров К.С., Шеголев Н.Л. Исследование характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром // Наука и образование. 2012. № 6. С. 351-362. DOI: 10.7463/0612.0431788
9. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямо-токе и перекрестном токе / Пер. с нем. И.Н. Дулькина. — М.: Энергоиздат, 1981. — 384 с.
10. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей теплообмена // Теплоэнергетика. 1970. № 9. С. 75-78.
11. Силюянова М.В., Попова Т.В. Исследование теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56934>
12. Краев В.М. Современное состояние исследований нестационарных турбулентных течений // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 61-67.
13. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. — 6-е изд. — Л.: Машиностроение, 1979. — 520 с.
14. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. — М.: Машиностроение, 1977. — 108 с.
15. Ремчуков С.С., Ярославцев Н.Л. Исследование влияния загромождения каналов компактных теплообменников на их теплогидравлические характеристики // Эпоха науки. 2016. № 8. С. 186-201.
16. Ярославцев Н.Л., Ремчуков С.С. Анализ теплогидравлических характеристик пластинчато-ребристых интенсификаторов теплообмена // Гагаринские чтения — 2017: Сборник тезисов докладов. — М.: МФИ, 2017. С. 548.
17. Focke W., Zachariades J., Olivier J. The Effect of the Corrugation Inclination Angle on the Thermohydraulic Performance of Plate Heat Exchangers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1985. Vol. 28(8), pp. 1469-1479. DOI: 10.1016/0017-9310(85)90249-2
18. Данилов М.А., Попова Т.В. и др. Методика параметрического проектирования применительно к пластинчатому теплообменнику // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: Сборник трудов III Международной научно-практической конференции (15-16 августа 2014 г.). — Новосибирск: International Scientific Institute «Educatio», 2014. С. 111-113.
19. ANSYS CFX Release 11.0, 2006. <http://product.caenet.cn/uploadfiles/12872437250986625020081129090050986.pdf>
20. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: Учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехнического института, 2012. — 88 с.

COMPUTER AIDED DESIGN AND COMPUTING OF A PLATE-TYPE HEAT EXCHANGER FOR SMALL-SIZE GAS TURBINE ENGINE

Remchukov S.S. *, Danilov M.A. **, Chistov K.A. ***

Central Institute of Aviation Motors,
CIAM, 2, Aviamotornaya str., Moscow, 111116, Russia

* e-mail: remchukov.sviatoslav@yandex.ru

** e-mail: danilovma@mail.ru

*** e-mail: evander2010@yandex.ru

Abstract

The article presents computational complex allowing perform computer aided design and calculation of a compact heat exchanger for a small-size gas turbine engine.

The coomputational complex includes a number of blocks based on open commercial programs. The blocks are united by the common software algorithm, developed at Central Institute of Aviation Motors (CIAM).

The input data is changed at each iteration to obtain the required parameters, namely, the regeneration degree and hydraulic resistance.

Computer aided design and calculation include the steps of the initial data entering into the parametric model, checking compliance with the restrictions, automatic model building, meshed models preparation, working medium flowing calculation and computational results output. The initial data is set with account for

limitations, such as overall size restrictions and material outlet depth. The possibility of obtaining better thermohydraulic characteristics depending on the model geometry should be accounted for as well.

Automatic building of models is performed according to the set parameters.

At the next stage, the built models are loaded to the ICEM CFD program, and meshes building is performed.

The obtained grid models are used for calculation in Ansys CFX software. Full pressures and temperatures of air and gas at the inlet, as well as the flow rate of gas and air at the outlet are set as boundary conditions. The employed turbulence model is Shear Stress Transport model.

After calculation termination, the resulting file, containing all significant exchanger computational parameters, is formed in the form of a table.

In case of the obtained parameters discrepancy with the claimed requirements, the parameters correction is performed with subsequent repetition of the considered algorithm.

Automation of the design and computing algorithm allows employing it together with CAD complexes for multi-criteria optimization.

The developed computing complex allows obtaining the optimal heat exchanger configuration for a specific task within the specified limits. The calculating complex was being employed in CIAM for the heat exchanger envelope updating, which led to the regeneration degree increase from 62% to 76%, when total hydraulic losses decreased to 1,27% with requirements and restrictions compliance. The genetic algorithm was used as an optimization method.

Keywords: small-size gas turbine engine, plate-type heat exchanger, parametric engineering.

References

1. Lanskii A.M., Lukachev S.V., Kolomzarov O.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 47-57.
2. Shmagin K.I., Popova T.V., Lomazov V.S., Osipov I.V., Timofeev V.V., Danilov M.A., Knyazev A.N. *Patent RU 2563079 C1*, 20.09.2015.
3. Dreitser G.A. *Kompaktnye teploobmennye apparaty* (Compact heat exchangers), Moscow, MAI, 1986, 73 p.
4. *Kozhukhotrubnyi (kozhukhotrubchatyi) teploobmennik. Ustroistvo i printsip raboty*, <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>
5. *Plastinchatyi teploobmennik. Ustroistvo i printsip raboty*, <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-phe/>
6. Baranovskii N.V., Kovalenko L.M., Yastrebenetskii A.R. *Plastinchatye i spiral'nye teploobmenniki* (Plate and spiral heat exchangers), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 288 p.
7. Antuf'ev V.M. *Effektivnost' razlichnykh form konvektivnykh poverkhnostei nagreva* (Efficiency of various shapes of convective heating surfaces), Moscow, Leningrad, Energiya, 1966, 184 p.
8. Egorov K.S., Shchegolev N.L. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 6, pp. 351-362. DOI: 10.7463/0612.0431788
9. Hausen H. *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom*. Springer-Verlag-Berlin Heidelberg-New York, 1976, 432 p.
10. Savostin A.F., Tikhonov A.M. *Teploenergetika*, 1970, no. 9, pp. 75-78.
11. Siluyanov M.V., Popova T.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 80, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=56934>
12. Kraev V.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 61-67.
13. Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* (Cold forging handbook), Leningrad, Mashinostroenie, 1979, 520 p.
14. Tikhonov A.M. *Regeneratsiya tepla v aviatsionnykh GTD* (Heat regeneration in gas turbine engines), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 108 p.
15. Remchukov S.S., Yaroslavtsev N.L. *Epokha nauki*, 2016, no. 8, pp. 186-201.
16. Yaroslavtsev N.L., Remchukov S.S. *Gagarinskii chteniya – 2017. Sbornik tezisov dokladov*. Moscow, MFI, 2017, p. 548.
17. Focke W., Zachariades J., Olivier J. The Effect of the Corrugation Inclination Angle on the Thermohydraulic Performance of Plate Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1985, vol. 28(8), pp. 1469-1479. DOI: 10.1016/0017-9310(85)90249-2
18. Danilov M.A., Popova T.V. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (15-16 August 2014) "Nauchnye perspektivy XXI veka. Dostizheniya i perspektivy novogo stoletiya"*, Novosibirsk, International Scientific Institute "Educatio", 2014, pp. 111-113.
19. *ANSYS CFX Release 11.0*, 2006, <http://product.caenet.cn/uploadfiles/12872437250986625020081129090050986.pdf>
20. Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techenii* (Turbulence modeling in of complex flows calculation), St. Petersburg, Politekhnikeskii institut, 2012, 88 p.