

Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения

Светлаков А.Л., Вербанов И.С., Маслова Д.В., Гулимовский И.А., Шлякотин В.Е.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: alsvetlakov@ciam.ru

Представлены результаты параметрического расчетного исследования трех типов теплообменных аппаратов авиационного назначения: трубчатого, размещенного в канале наружного контура ТРДД; пластинчатого с гофрированными, зигзагообразными и микрохолмистыми теплообменными поверхностями; перспективного с ветвящимися каналами. Исследованы особенности течения в таких теплообменниках и определены их теплогидравлические характеристики. Расчеты выполнены преимущественно в трехмерной постановке.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, трубчатый теплообменник, пластинчатый теплообменник, микрохолмистая поверхность, ветвящаяся структура, математическое моделирование.

Development of calculation and design methods for aviation heat exchangers

Svetlakov A.L., Verbanov I.S., Maslova D.V., Gulimovskiy I.A., Shlyakotin V.E.

CIAM, Moscow

Results of the parametric computational study of three types of aviation heat exchangers are presented: tubular heat exchanger located in the bypass duct of the turbofan engine, plate heat exchanger with corrugated, zigzag and micro-hill exchange surfaces and advanced heat exchanger with bionic channels. Flow features in such heat exchangers are investigated and their thermohydraulic characteristics are determined. Calculations were performed mainly in a three-dimensional formulation.

Keywords: heat exchanger, tubular heat exchanger, plate heat exchanger, micro-hill surfaces, bionic structure, mathematical modeling.

Введение

В настоящее время в ЦИАМе ведутся активные исследования теплообменных аппаратов (ТА) авиационного назначения с различной формой теплообменных поверхностей. Исследования охватывают как традиционные трубчатые и гофро-пластинчатые ТА, так и перспективные ТА с микрохолмистыми поверхностями и последовательно ветвящимися каналами, изготовление которых возможно методами аддитивных технологий. При исследованиях широко применяется численное моделирование (численный эксперимент), что позволяет определить теплогидравлические характеристики ТА с учетом широкого диапазона изменения размеров и формы теплообменных поверхностей, а также изучить особенности течения в ТА с целью последующей оптимизации их конструкции.

Результаты расчетных исследований для некоторых типов ТА (трубчатых, пластинчатых, с ветвящимися каналами) представлены ниже.

Трубчатые ТА с разреженными пучками для системы охлаждения элементов ТРДД

Основопологающим требованием для перспективных ТРДД большой степени двухконтурности является улучшение топливной эффективности, которое может быть достигнуто за счет повышения уровня параметров рабочего цикла, в том числе увеличения температуры газа перед турбиной. При этом для обеспечения ресурса «горячих» узлов двигателя и, прежде всего, турбины высокого давления потребуются эффективное охлаждение. Один из способов такого охлаждения заключается в дополнительном захолаживании охлаждающего

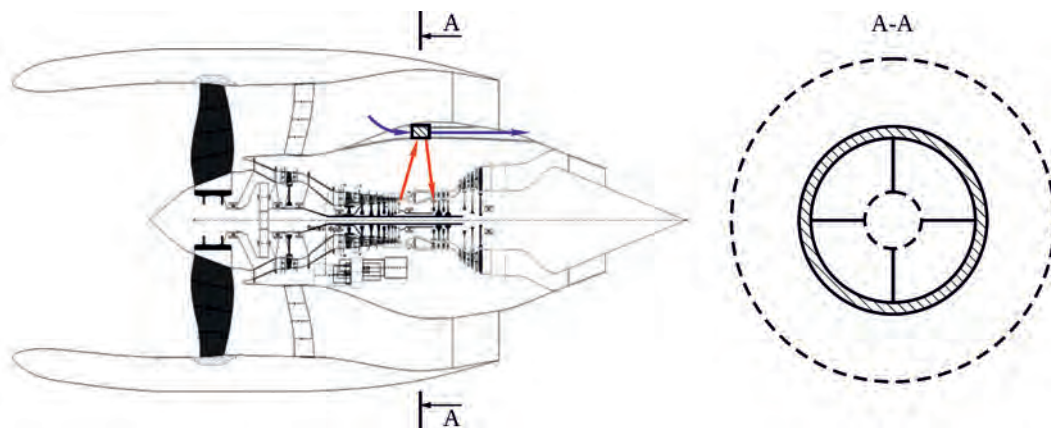


Рис. 1. Схема размещения ВВТ (с равномерным заполнением кольцевого пространства трубчатой матрицей) в надроторном канале ТРДД большой степени двухконтурности

щего воздуха высокого давления за счет хладоресурса воздуха низкого давления из наружного контура в воздухо-воздушном теплообменнике (ВВТ), расположенном в специальном надроторном канале ТРДД (рис. 1).

По результатам предварительной проработки вариантов исполнения ВВТ системы охлаждения турбины ТРДД в качестве базового варианта был выбран трубчатый ТА с коридорным расположением трубок. Данный тип ВВТ достаточно известен, например, по европейской авиационной программе NEWAC [1] или по ТРДД семейства АЛ-31 [2]. Предложенный к проработке ТА обладает по меньшей мере двумя специфическими особенностями: разреженностью трубного пучка и размещением его в специальном надроторном канале, что связано с размерностью двигателя в части степени двухконтурности.

Данные по разреженным трубным пучкам (с отношением межтрубного шага к диаметру труб больше 3...4) ограничены, поскольку они нехарактерны для авиационного и общепромышленного применения. Инженерный анализ показал, что существенное влияние

на теплофизические характеристики таких пучков оказывает изменение угла натекания потока относительно направления коридорного расположения рядов трубок. Таким образом, характерное для ТРДД отклонение течения от осевого в наружном контуре за вентилятором вплоть до углов $\alpha = 3 \dots 5^\circ$ (остаточная закрутка потока), не оказывающее критического влияния на характеристики двигателя в целом, должно учитываться при проектировании подобного ВВТ.

Для оценки влияния закрутки потока в канале с ВВТ на его характеристики выполнено численное моделирование течения сквозь разреженный трубный пучок в условиях, характерных для ТРДД, и определено влияние угла натекания потока на теплоотдачу и потери полного давления. Расчетные модели (рис. 2) включали в себя пять рядов трубок по фронту, что объясняется дополнительной целью по использованию результатов расчетов для анализа размерности репрезентативной модели ВВТ для последующих стендовых испытаний. Для построения моделей использована неструктурированная тетра-сетка со сгущением в области пограничных слоев. Модель турбулентности – SST. Расчетный комплекс – ANSYS CFX (CID 1039481). Валидация модели проведена по известным данным для внешнего обтекания единичной трубки.

На основе 2D модели выполнены расчеты для углов натекания потока на трубки в диапазоне $\alpha = 0 \dots 20^\circ$ с последующей оценкой влияния угла натекания на характеристики ВВТ по параметрам:

– относительным потерям полного давления $\Delta P_{x \text{ отн}}^* = (1 - \sigma_{xi}^*) / (1 - \sigma_{x0}^*)$, где σ_{xi}^* и σ_{x0}^* – коэффициенты полного давления при угле натекания $\alpha_i \neq 0^\circ$ и $\alpha_0 = 0^\circ$, соответственно;

– относительному уровню захлаживания $\Delta T_{\text{охл.отн}} = \Delta T_{\text{охл.}i} / \Delta T_{\text{охл.}0}$, где $\Delta T_{\text{охл.}i}$ и $\Delta T_{\text{охл.}0}$ записаны аналогично коэффициентам давления, причем $\Delta T_{\text{охл}}$ рассчитывается как условная величина по тепловому балансу для 2D модели.

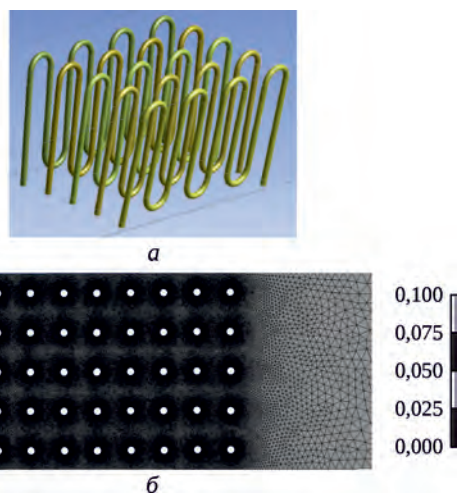


Рис. 2. Модель разреженного трубного пучка: а – 3D модель; б – расчетная сетка 2D модели

Обнаружено, что наличие угла натекания $\alpha \neq 0^\circ$ деформирует коридорную картину течения (рис. 3), в результате чего вихревой след, возникающий за каждой трубкой, отклоняется от оси ВВТ и не полностью омывает трубки следующего ряда, как в исходном коридорном варианте при $\alpha = 0^\circ$. При «неосевом» обтекании разреженного пучка каждая трубка в его глубине омывается более холодным воздухом из межрядного пространства, что увеличивает реализуемые на трубках температурные напоры, однако при этом уменьшается положительное влияние турбулизации потока в вихревых следах на коэффициенты теплоотдачи глубинных трубок. Из-за разнонаправленного влияния этих факторов изменение теплогидравлических характеристик при изменении угла натекания носит существенно немонотонный характер.

При натекании потока на трубки ВВТ под малыми углами $\alpha < 4 \dots 6^\circ$ наблюдается рост температуры холодного потока на выходе, сопровождающийся ростом потерь полного давления в канале холодного воздуха. Дальнейшее увеличение угла натекания до 20° приводит к обратному эффекту – постепенному снижению относительных потерь и уровня захлаживания (рис. 4).

Расчет на основе 3D модели, требующий значительно больших затрат вычислительных ресурсов, проведен для двух углов натекания потока: $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$. По результатам отмечено несколько меньшее влияние угла натекания ($\Delta P_{x\text{отн}}^* = 1,1$ и $\Delta T_{\text{охл.отн}} = 1,05$), что объясняется существенным различием двухмерной и трехмерной картин течения, особенно в областяхгиба U-образных трубок.

Сильное влияние угла натекания на структуру течения в разреженном коридорном ВВТ можно использовать для коррекции его характеристик. В частности, при доводке ТРДД можно компенсировать потенциальный недобор по уровню захлаживания воздуха в ТА порядка 4...6% проектировочной величины. Ненулевой угол натекания может быть обеспечен даже при нулевой закрутке потока за счет конструктивного изменения угла установки рядов трубок в пучке по отношению к оси канала холодного воздуха. С целью экспериментального подтверждения уровня влияния угла натекания потока на теплогидравлические характеристики ВВТ начаты работы по проектированию специальной испытательной установки.

Размещение ВВТ в надроторном канале, воздух в который отбирается из наружного контура (рис. 5), требует рассмотрения не только вращательной неоднородности потока, но и эпюры потока в поперечном сечении, перпендикулярном линиям тока. В частности, необходимо оценить равномерность (безотрывность) течения, а также геометрические параметры и эффективность ТА в условиях возникающей неоднородности.

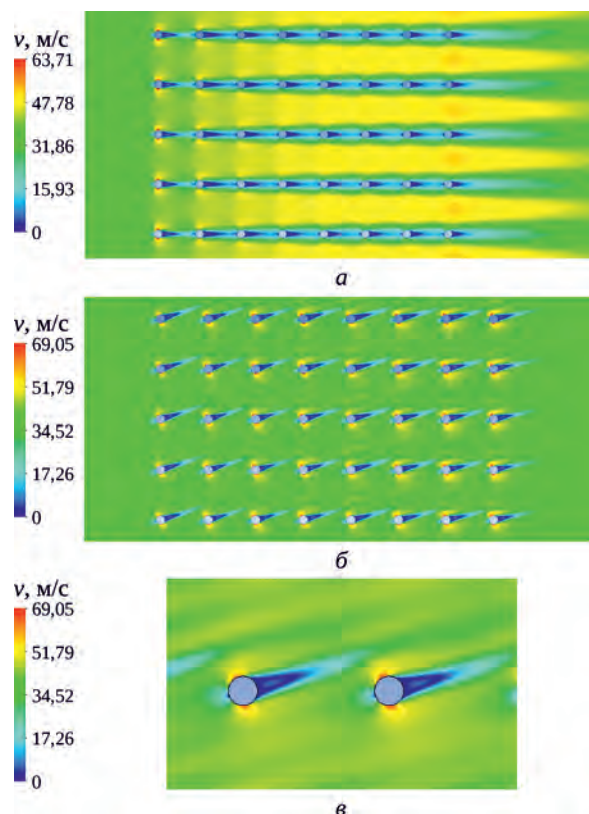


Рис. 3. Картина течения в разреженном трубном пучке (распределение скорости потока) при различных углах натекания: а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = 20^\circ$; в – $\alpha = 20^\circ$ (увеличено)

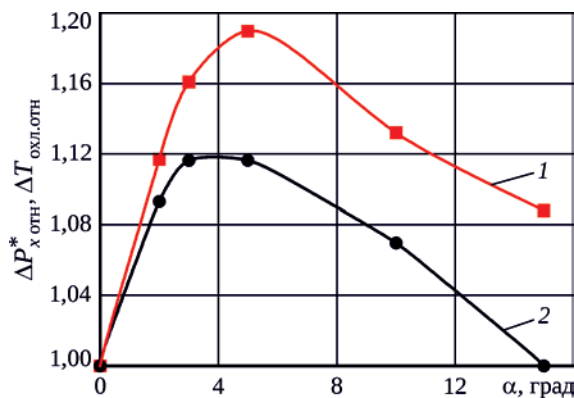


Рис. 4. Зависимость относительных потерь полного давления (1) и уровня захлаживания (2) в разреженном трубном пучке от угла натекания потока

Анализ результатов трехмерного расчета исходного варианта надроторного канала (рис. 5,а) с размещенным в нем трубчатым ВВТ показал, что расход холодного воздуха через ТА на расчетном режиме составляет $G_{\text{хол}} = 92,6$ кг/с, что существенно выше расхода $G_{\text{хол}} = 24,0$ кг/с, на который был спроектирован ВВТ.

Попытки перепрофилировать надроторный канал для снижения избыточного расхода холодного воздуха к успеху не привели. В частности, сужение выходного

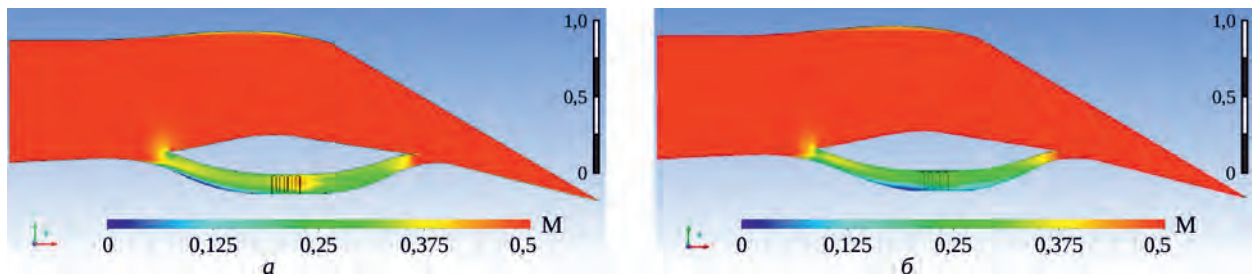


Рис. 5. Число Маха для течения в надроторном канале ТРДД с установленным ВВТ:
 а – исходная форма канала; б – канал с зауженными сечениями входа и выхода

сечения канала на 30% привело к снижению расхода воздуха до значения $G_{\text{хол}} = 67,6$ кг/с, но во входной части канала возникла большая застойная зона, а профиль скорости перед ВВТ стал существенно неравномерным. Частичное выравнивание поля скоростей в надроторном канале происходило только после ВВТ, являющегося определяющим гидравлическим сопротивлением. Неравномерность профиля входной скорости, очевидно, может привести к существенному снижению эффективности ТА по сравнению с расчетной.

Повторное перепрофилирование надроторного канала с одновременным сужением входного и выходного сечений привело к уменьшению застойной зоны, течение перед ВВТ стало более равномерным, но расход холодного воздуха увеличился до $G_{\text{хол}} = 68,5$ кг/с. Дальнейшее сужение выходной части канала привело к увеличению застойной зоны на входе в ТА, что не позволило привести расход воздуха через канал к требуемому уровню. Профили скорости воздуха перед ВВТ для трех рассмотренных выше конфигураций канала показаны на рис. 6.

Таким образом, только за счет перепрофилирования входного и выходного участков надроторного канала не удастся обеспечить равномерное течение воздуха перед ВВТ с выбранными размерами трубного пучка и проектировочной величиной расхода. Величина расхода холодного воздуха через ВВТ должна выбираться одновременно с профилированием

надроторного канала ТРДД. Для снижения расхода холодного воздуха через надроторный канал с ТА при сохранении максимально равномерного профиля скорости необходимо перепроектирование ВВТ с уменьшением высоты его трубного пучка и, соответственно, высоты надроторного канала в месте установки ТА.

Пластинчатые ТА с различными типами турбулизаторов течения

Применение в каналах пластинчатых ТА турбулизаторов течения различной формы является общепринятым способом повышения их характеристик. В ЦИАМ, например, разрабатывались пластинчатые ТА с поверхностями Френкеля, представляющими собой пространственно пересекающиеся гофры [3, 4]. Развитие методов 3D проектирования позволило расширить номенклатуру и диапазоны изменения геометрических параметров теплообменных поверхностей сложной формы. Были рассмотрены гофрированные (ГФТП), зигзагообразные (ЗТП) и микрохолмистые (МХТП) теплообменные поверхности.

ЗТП представляет собой сочетание выступов и впадин сфероидального очертания, которые выштампованы в шахматном порядке. Технология изготовления, а также методика и результаты экспериментального исследования ЗТП представлены в [5]. Геометрическое отличие поверхностей типа ЗТП и МХТП (рис. 7) выра-

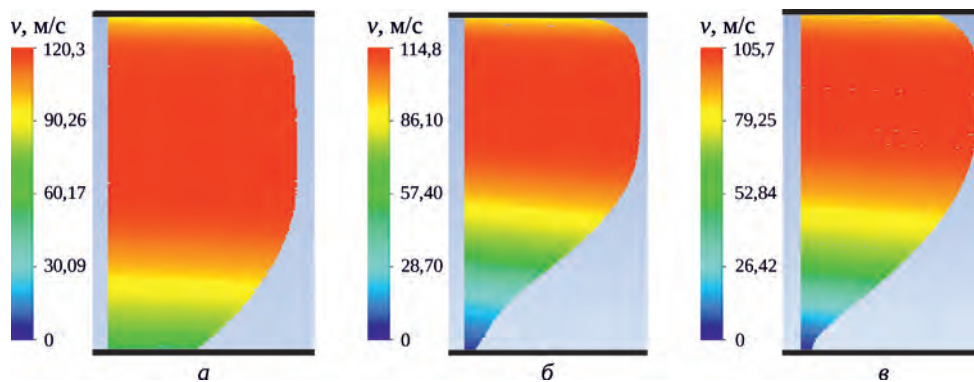


Рис. 6. Профиль скорости холодного воздуха в поперечном сечении надроторного канала перед ВВТ:
 а – исходная форма канала ($G_{\text{хол}} = 92,6$ кг/с); б – канал с зауженной выходной частью ($G_{\text{хол}} = 67,6$ кг/с);
 в – канал с зауженными входной и выходной частями ($G_{\text{хол}} = 68,5$ кг/с)

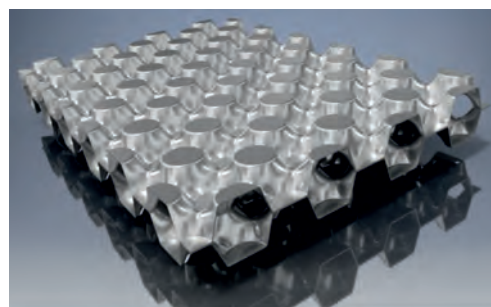
жено в том, что в процессе холодной штамповки формообразующими элементами для ЗТП являются полушеры, закрепленные в шахматном порядке на плоской поверхности штампа, а для МХТП – цилиндры с фасками на кромках, закрепленные аналогичным образом.

Расчетное исследование ЗТП и МХТП выполнено в программном комплексе ANSYS CFX (CID 1039481) на основе моделей репрезентативных пластинчатых ТА (нагреваемых двухпластинчатых конвертов с учетом условия симметрии на боковых поверхностях). Рабочее тело – воздух.

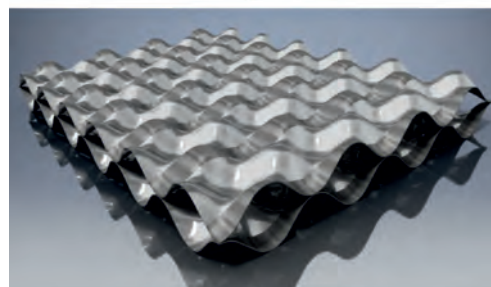
Сравнение различных моделей турбулентности при расчете течения в межпластинном пространстве проведено для ЗТП, для валидации использованы экспериментальные данные [5]. При расчетах апробированы следующие модели турбулентности: однопараметрические модели Спаларта – Аллмараса (SA) и Eddy Viscosity Transport Model (EVTE), четырехпараметрическая модель Transition SST GTM с учетом ламинарно-турбулентного потока вблизи стенки, семипараметрическая модель Omega Reynolds model stress (Omega RMS). Параметр y^+ во всех пристеночных областях не превышал 1,0 ($y^+ < 0,2$ для модели турбулентности EVTE и SA). Характерный размер при расчете чисел Рейнольдса и Нуссельта – максимальная высота межпластинного пространства.

При высоких и умеренных числах Рейнольдса ($Re > 4000$) в области развитого турбулентного течения наилучшие результаты валидации показывают модели турбулентности SST GTM и EVTE (рис. 8). Следует заметить, что учет ламинарных струй в пристеночной области (модель LT Blend) практически не влияет на результаты численного расчета, что характерно для отрывных течений вблизи стенки. Худшие результаты валидации для чисел Рейнольдса $Re = 1000...2500$ могут быть объяснены переходным режимом течения.

Сравнение теплогидравлических характеристик ЗТП и МХТП, проведенное при сходных характерных



а



б

Рис. 7. Твёрдотельная модель конверта пластин с МХТП (а) и ЗТП (б)

размерах канала и параметрах построения сетки для модели турбулентности SST GTM, показало, что в диапазоне чисел $Re = 1000...7000$ критерий Нуссельта для МХТП выше, чем для ЗТП; для $Re = 7000$ отличие составляет 30% в пользу МХТП. При этом изменение критерия Эйлера, характеризующего гидравлические потери, для обоих типов поверхностей соответствует автомодельному режиму по числу Рейнольдса при $Re > 2000$, причем величины потерь для МХТП в 2,5 раза выше, чем для ЗТП. Полученные данные позволяют сделать предварительный выбор между поверхностями типа МХТП и ЗТП при проектировании конкретного пластинчатого ТА.

Кроме непосредственного определения теплогидравлических характеристик различных пластинчатых поверхностей 3D расчеты предоставляют информацию о структуре течения в межпластинном пространстве,

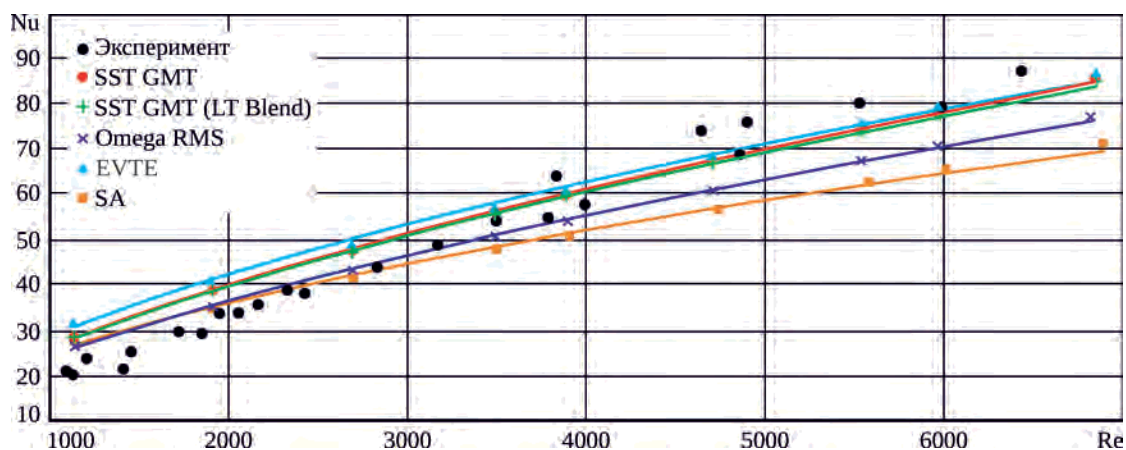


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов ЗТП при различных моделях турбулентности

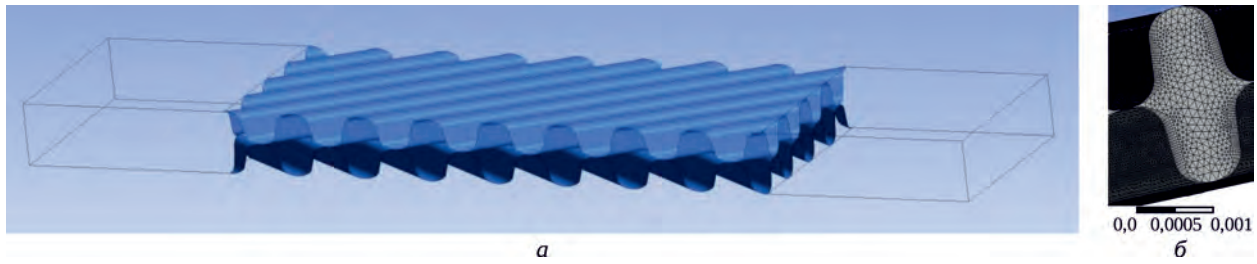


Рис. 9. Внешний вид конверта гофрированных пластин (а) и расчетной сетки (б)

которая может быть использована для оптимизации формы турбулизаторов, например, пересекающихся гофров.

С этой целью для ГФТП (рис. 9) построена параметризованная твердотельная модель с варьируемыми углом перекрещивания гофров $\psi = 60 \dots 120^\circ$ и отношением высоты гофра к шагу $h_g/t_g = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$. На боковых поверхностях расчетной области задано условие перетекания.

Проведенные расчеты подтвердили существование различных характерных структур потока:

- с преимущественно прямолинейным течением вдоль гофров;
- с преимущественно зигзагообразным течением в направлении от входа к выходу пластин с поворотами потока внутри элементарных ячеек, образованных пересечениями гофров.

Указанные типы течения ранее были визуализированы экспериментально при варьировании углов перекрещивания гофров [6]. Вместе с тем, схожее изменение картины течения происходит также при изменении относительной высоты гофров (рис. 10), что не было подробно исследовано при натурных испытаниях. Перестройка картины течения в вычислительном эксперименте коррелирует с изменением тепловых характеристик, в частности с изменением показателя степени в характерной зависимости $Nu \sim Re^n$, полученной при обобщении результатов серии численных расчетов.

Таким образом, вычислительный эксперимент на основе валидированных 3D моделей позволяет выполнить количественное и качественное сравнение различных типов турбулизаторов в части отдельных элементов их профиля, в частности формы единичного выступа для МХТП и ЗТП или относительной высоты гофра для ГФТП. Результаты расчетов могут являться основой для формирования базы данных теплогидравлических характеристик и построения критериальных зависимостей для теплообменных поверхностей различной формы. Эта информация необходима для предварительного проектирования и оптимизации перспективных пластинчатых ТА. Важно, что эти оценки могут быть получены без испытаний большого числа натуральных образцов, для изготовления которых требуются дорогостоящие матрицы.

Теплообменные аппараты с ветвящимися каналами

При проектировании авиационных ТА часто возникает задача компоновки их теплообменных поверхностей в объеме сложной геометрической формы, который профилируется по внешним для теплообменника, но более критичным для двигателя условиям. В частности, при размещении ТА во втором контуре ТРДД внешними «ограничителями», помимо формы контура, являются расположенные в нем трубопроводы, арматура и элементы других двигательных систем. Сложность компоновки обуславливает повышение доли

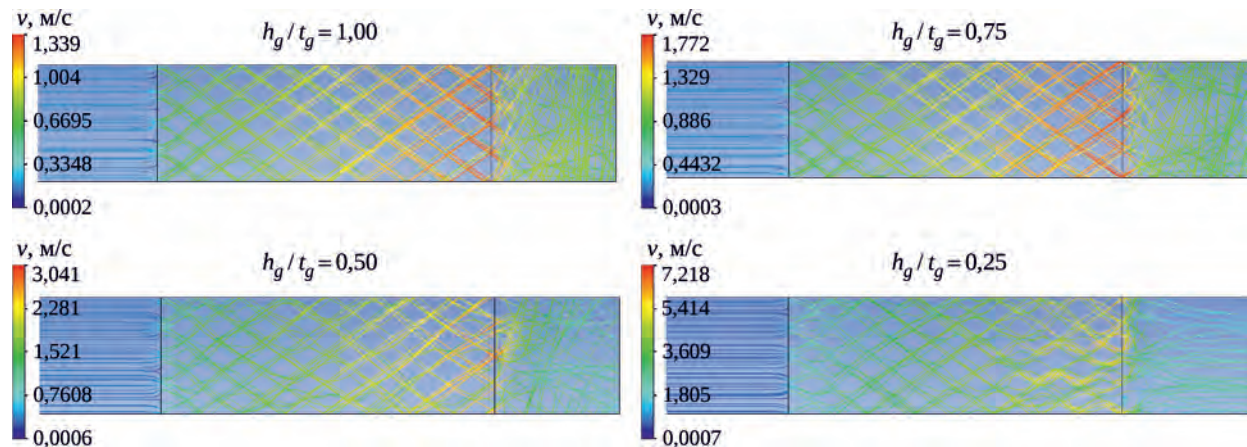


Рис. 10. Изменение структуры течения (линии тока) при изменении относительной высоты гофров при $\psi = 70^\circ$

сборных и раздаточных коллекторов в составе ТА, что ведет к значительным потерям напора из-за гидравлического сопротивления коллекторов. Ограничения на форму элементов ТА определяются также технологическими соображениями: коллекторы обычно изготавливаются сваркой листовых металлов, вальцовкой труб, а теплообменные поверхности – штамповкой листа или из труб.

Развитие аддитивных технологий снимает большинство технологических и формообразующих ограничений, накладываемых на конструкцию ТА.

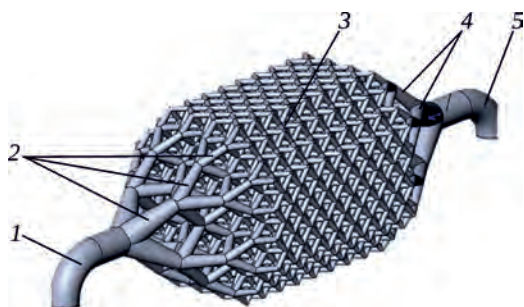


Рис. 11. Теплообменник с ветвящимися каналами и матрицей октаэдрической структуры: 1 – подводящий канал; 2 – разветвляющиеся каналы; 3 – матрица основных теплообменных каналов; 4 – соединяющиеся каналы; 5 – отводящий канал

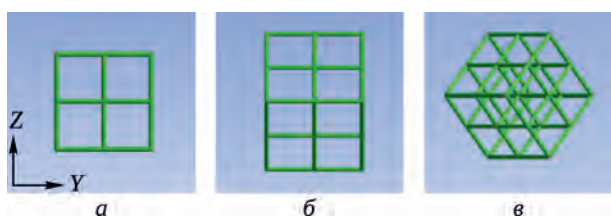


Рис. 12. Проекция ячеек матрицы ТА октаэдрической формы на плоскость, перпендикулярную направлению потока, при различных углах поворота модели: а – $\theta_Y = 0^\circ$, $\theta_Z = 0^\circ$; б – $\theta_Y = 45^\circ$, $\theta_Z = 0^\circ$; в – $\theta_Y = 45^\circ$, $\theta_Z = 45^\circ$

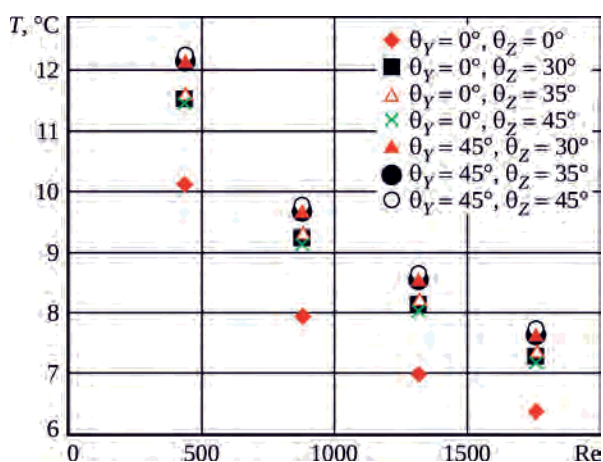


Рис. 13. Подогрев потока в зависимости от числа Re потока при различных углах обтекания матрицы

Конфигурация теплообменных каналов может быть выполнена в виде древовидной или разветвленной структуры (рис. 11) [7]. В таком ТА «внутриканальный» теплоноситель распределяется по ветвящимся теплообменным каналам различного диаметра: наибольший диаметр имеют подводящий и отводящий каналы, наименьший – теплообменные каналы матрицы ТА, которые могут иметь любую форму (спиральные, трубчатые, зигзагообразные и т.д.). «Внешний» теплоноситель омывает сначала поверхности с увеличивающимся периметром, затем ядро матрицы с каналами постоянного сечения и после этого поверхности с уменьшающимся до исходного значения периметром.

С целью исследования ТА с ветвящимися каналами была поставлена задача разработать методики их расчета и проектирования. На первом этапе рассмотрено «внешнее» обтекание каналов матрицы правильной октаэдрической (кубической) структуры. Для этого создана расчетная 3D модель, состоящая из восьми элементарных ячеек, с возможностью параметрического изменения углов поворота модели по отношению к направлению омывающего потока (рис. 12): θ_Y – угол поворота модели относительно оси Y, θ_Z – угол поворота модели относительно оси Z, где Y и Z – главные оси элементарного куба матрицы.

По результатам расчетов определено качественное изменение теплообменных характеристик при варьировании углов обтекания матрицы элементарных ячеек (рис. 13): наибольшие подогревы потока получены для углов натекания $30 \dots 45^\circ$; наименьший подогрев соответствует коридорной схеме обтекания каналов при углах $\theta_Y = 0^\circ$ и $\theta_Z = 0^\circ$.

Заключение

По результатам численного эксперимента:

- для трубчатых воздухо-воздушных ТА с разреженными пучками труб показано влияние остаточной закрутки потока на потери давления и теплоотдачу при обтекании пучка;

- для воздухо-воздушного ТА системы охлаждения ТРДД, расположенного в надроторном канале, показано возникновение в канале отрывных зон, устранение которых требует предварительной увязки проектировочных величин расхода через ТА и высоты канала;

- для пластинчатых микрохолмистых и зигзагообразных поверхностей выполнена сравнительная оценка теплогидравлических характеристик, показывающая влияние формы единичного выступа-турбулизатора; для гофрированных пластин определено влияние угла перекрещивания гофров и относительной высоты гофра (приведенной к шагу между гофрами);

– проведена оценка теплогидравлических характеристик одного из вариантов матрицы перспективного ТА с последовательно ветвящимися каналами.

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и оптимизации ТА различного назначения.

Литература

1. NEWAC. Warsaw Workshop presentation. 2010.
2. Леонтьев М.К. Атлас деталей и узлов двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф. М.: МАИ, ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ им. А. Льюльки», 2008. 20 с.
3. Худяков А.И., Цветков С.И. Расчет коллекторного кольцевого пластинчатого теплообменника // в сб. «Теплообменные аппараты газотурбинных двигателей». М.: ЦИАМ. Труды № 1282. Вып. 7. 1991. С. 4–11.
4. Баранов Ю.Ф., Митин Б.М. Пластинчатые теплообменники системы регенерации тепла в ТРДД // в сб. «Теплообменные аппараты газотурбинных двигателей». М.: ЦИАМ. Труды № 750. Вып. 2. 1977. С. 5–30.
5. Андреев М.М., Берман С.С. Теплообменная аппаратура энергетических установок. М.: МАШГИЗ., 1963. 240 с.
6. Ciofalo M., Stasiek J., Collins M.W. Investigation Of Flow And Heat Transfer In Corrugated Passages. Part II: Numerical Simulations., Int. J. Heat And Mass Transfer. Vol. 39. No. 1. P. 165–192.
7. Kremers A., Pieper M. Simulation and Verification of Bionic Heat Exchangers with COMSOL Multiphysics // Faculty Energy Technology, FH Aachen. URL: https://www.comsol.ru/paper/download/292471/kremers_presentation.pdf

References

1. NEWAC. Warsaw Workshop presentation. 2010.
2. Leont'ev M.K. Atlas detalei i uzlov dvukhkoturnogo turboreaktivnogo dvigatelja AL-31F [Atlas of Parts and Components of Bypass Turbojet Engine AL-31F]. Moscow: MAI, Lyulka Scientific and Technical Center of the NPO "Saturn", 2008. 20 p.
3. Khudiakov A.I., Tsvetkov S.I. Raschet kollektornogo kol'tseвого пластинчатого теплоobmennika. V sbornike "Teploobmennye apparaty gazoturbinnnykh dvigatelei" [Calculation of a Collector-Type Annular Plate Heat Exchanger. In Digest "Heat Exchangers of Gas Turbine Engines"]. Moscow: TsIAM. Proceeding no. 1282. Issue 7. 1991. P. 4–11.
4. Baranov Iu.F., Mitin B.M. Platinchatye teploobmenniki sistemy regeneratsii tepla v TRDD. V sbornike "Teploobmennye apparaty gazoturbinnnykh dvigatelei" [Plate Heat Exchangers of a Heat Recovery System in Bypass Turbojet Engines. In Digest "Heat Exchangers of Gas Turbine Engines"]. Moscow: TsIAM. Proceeding no. 750. Issue 2. 1977. P. 5–30.
5. Andreev M.M., Berman S.S. Teploobmennaja apparatura energeticheskikh ustanovok [Heat Exchange Equipment of Power Units]. Moscow: MASHGIZ, 1963. 240 p.
6. Ciofalo M., Stasiek J., Collins M.W. Investigation Of Flow And Heat Transfer In Corrugated Passages. Part II: Numerical Simulations., Int. J. Heat And Mass Transfer. Vol. 39. No. 1. P. 165–192.
7. Kremers A., Pieper M. Simulation and Verification of Bionic Heat Exchangers with COMSOL Multiphysics // Faculty Energy Technology, FH Aachen. URL: https://www.comsol.ru/paper/download/292471/kremers_presentation.pdf

Материалы получены редакцией 24.05.2018