

На правах рукописи

Диомидов Илья Георгиевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ОТНОШЕНИЯ  
ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В КОМПАКТНОМ ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТОМ  
ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Чичиндаев Александр Васильевич**

Официальные оппоненты: **Алиферов Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Новосибирский государственный технический университет, кафедра автоматизированных электротехнологических установок, заведующий кафедрой

**Логинов Владимир Степанович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Томский политехнический институт, кафедра Теоретической и промышленной теплотехники, профессор

Ведущая организация: Московский авиационный институт,  
(Технический университет), г. Москва

Защита состоится «19» апреля 2013 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «18» марта 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Чичиндаев А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Постоянное повышение цен на энергоносители в последние годы выдвигает на передний план проблемы энергосбережения и повышения эффективности процессов преобразования энергии. Теплообменные аппараты являются неотъемлемой частью энергетических установок, как стационарных, так и тех, которые используются в изделиях транспортного машиностроения. Повышение эффективности теплообменных аппаратов приводит к тому, что они работают во все более напряженных условиях эксплуатации (более высокие температуры, большие удельные тепловые потоки, большие перепады температур), в результате этого возрастает неравномерность распределения температуры по поверхности теплообмена. Теплообменники, сконструированные по традиционным методикам (В.М. Кейс, А.Л. Лондон (1967), Г.И. Воронин (1978)), обладают параметрами, отличными от оптимальных, потому что интегральная методика расчета и проектирования не учитывает особенности локального распределения температур. В более поздних работах Э.К. Калинина, Г.А. Дрейцера, С.А. Ярхо, Г.И. Воронина, Е.В. Дубровского (1981), Г.А. Дрейцера (1986, 2000), А.С. Мякочина (2006) основное внимание было направлено на разработку новых типов оребренных поверхностей с максимальной тепловой эффективностью и минимальными габаритами и массой. А. В. Чичиндаевым (2003, 2005) предложен подход к проектированию и оптимизации первичного теплообменника системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов (далее ПТО СКВ ЛА), основанный на управлении локальными значениями температуры теплообменной поверхности за счет изменения параметров оребрения и режимов течения теплоносителей и показана принципиальная возможность снижения термических напряжений в конструкции ПТО. Однако анализ влияния предложенного метода на другие характеристики ПТО (термодинамическая эффективность, габариты, гидравлическое сопротивление и т.д.) не был проведен, что затрудняет практическую реализацию предложенного подхода.

**Цель и задача исследования:** теоретическое исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений по теплообменной поверхности на

теплофизические параметры процесса теплопередачи в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках, обоснование, разработка и проверка методов повышения ресурса теплообменника.

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. в области теоретического исследования:

- разработка методики расчета процесса теплопередачи в компактном пластинчато-ребристом теплообменнике, учитывающей переменные термические сопротивления в горячем и холодном трактах;
- оценка необходимости учета влияния на процесс теплопередачи в первичном теплообменнике переноса тепла вдоль поверхности теплообмена за счет ее теплопроводности;
- исследование влияния переменных термических сопротивлений по поверхности теплообмена на распределение температур и термических напряжений по теплопередающей поверхности, тепловую эффективность теплообменника в области высоких температур горячего воздуха и больших перепадов температур между теплоносителями;
- разработка метода задания температуры теплообменной поверхности на этапе проектирования компактного пластинчато-ребристого теплообменника путем формирования переменного отношения термических сопротивлений по поверхности теплообмена в горячем и холодном трактах, позволяющего получать требуемые теплофизические параметры компактных теплообменников для заданных эксплуатационных режимов его работы;

2. в области прикладного исследования:

- разработка способов повышения ресурса первичного теплообменника СКВ ЛА за счет перераспределения температуры по теплообменной поверхности;

**Научная значимость и новизна работы** состоит в том, что:

- обоснована, разработана и проверена методика расчета процесса локальной теплопередачи в компактном теплообменнике с учетом переменных термических сопротивлений по поверхности теплообмена в горячем и холодном трактах;

- обоснован и разработан метод задания температуры теплопередающей поверхности компактного теплообменника на этапе проектирования, основанный на использовании переменного отношения термических сопротивлений по поверхности теплообмена в горячем и холодном трактах позволяющий, получать требуемые теплофизические параметры компактных теплообменников для заданных эксплуатационных режимов работы и методика оценки его эффективности;

- предложены научно-обоснованные способы повышения ресурса перекрестно-точного компактного пластинчато-ребристого теплообменника, работающего в условиях малоциклового нагружения при большой разности температур теплоносителей на входе в теплообменник, основанные на использовании переменного отношения термических сопротивлений для управления распределением температуры по теплообменной поверхности, улучшающие эксплуатационные свойства теплообменника за счет снижения максимальной температуры теплообменной поверхности и перепада температур в конструкции теплообменника.

**На защиту выносятся:**

1. Методика расчета компактного пластинчато-ребристого теплообменника, учитывающая переменное соотношение термических сопротивлений по поверхности теплообмена.
2. Результаты расчета распределения температуры по теплообменной поверхности компактного пластинчато-ребристого теплообменника (далее КПРТ) с переменным отношением термических сопротивлений, в широком диапазоне геометрических параметров оребрения.
3. Научно обоснованный метод повышения ресурса КПРТ, основанный на проведенном анализе влияния переменного термического сопротивления поверхности теплообмена на эквивалентные температурные напряжения конструкции.
4. Сформулированные в результате анализа данных численного моделирования процесса теплопередачи в ПТО СКВ ЛА рекомендации по использованию переменного отношения термических сопротивлений для задания распределения

температуры по теплообменной поверхности при конструировании теплообменника.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что:

- разработана методика теплового и конструкторского расчета компактного пластинчато-ребристого теплообменника позволяющая проектировать теплообменники с переменным отношением термического сопротивления теплообменной поверхности, как со стороны горячего, так и со стороны холодного теплоносителя;
- усовершенствован пакет прикладных программ для обеспечения возможности проведения комплексных исследований тепловых характеристик теплообменника в широком диапазоне параметров термического сопротивления теплообменной поверхности путем численного моделирования;
- показана эффективность предложенного способа повышения ресурса первичного теплообменника, состоящего в управлении температурой теплообменной поверхности за счет переменного отношения термических сопротивлений в горячем и холодном трактах.

**Достоверность полученных результатов** определяется сопоставлением полученных расчетных данных с экспериментальными и расчетными данными, полученными ранее другими авторами и тщательным тестированием программных модулей.

**Связь с научными программами.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-08-00321-а, а также фонда фундаментальных исследований НИР НГТУ в 2010 году.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанный пакет прикладных программ по моделированию процесса теплопередачи в компактном пластинчато-ребристом теплообменнике с переменным термическим сопротивлением по поверхности теплообмена внедрен в учебный процесс НГТУ для специальности «Системы жизнеобеспечения оборудования летательных аппаратов».

**Личный вклад соискателя.** Все работы по теме диссертации осуществлены автором или при его основном участии: постановка задачи, разработка метода и алгоритма решения, проведение расчетов, обработка и обобщение полученных результатов, формирование выводов и заключения.

**Апробация работы.** Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе:

8-ая, 9-я и 10-я международные конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2009, 2010, 2011); Всероссийская научно-техническая конференция «Наука, Промышленность, Оборона» (Новосибирск, НГТУ 2009, 2010, 2011, 2012).

**По теме диссертации опубликовано.** 13 печатных работ, в том числе 1 статья (в соавторстве) в ведущем научном журнале, входящем в перечень, рекомендованный ВАК РФ; 1 статья в (в соавторстве) в рецензируемом научном журнале, 5 статей в сборниках научных трудов, 6 статей в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников, включающего 73 наименований и приложений. Диссертация содержит 105 страниц основного текста, включая 61 рисунок, 5 таблиц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность проблемы исследования теплопередачи в ПТО СКВ ЛА для выявления способов оптимизации конструкции, показывается научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** приводится классификация конструкций теплообменников по процессу переноса, количеству и виду теплоносителей, механизму теплообмена, типу конструкции, организации потока, а также компактности поверхности теплообмена. Описываются основные особенности конструкции КПРТ (рис. 1). Рассматриваются особенности компоновки и работы ПТО СКВ ЛА (рис.2).

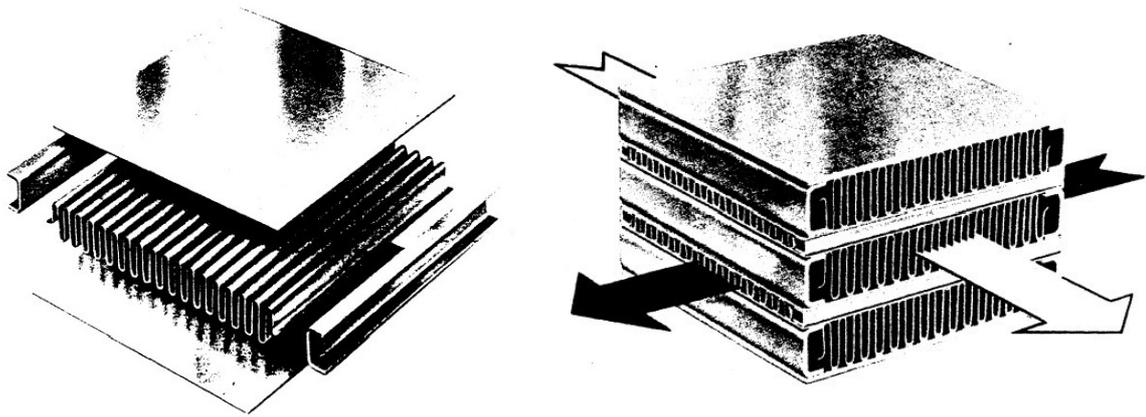


Рис. 1. Устройство пластинчато-ребристого теплообменника. Стрелками показаны направления течения теплоносителей.

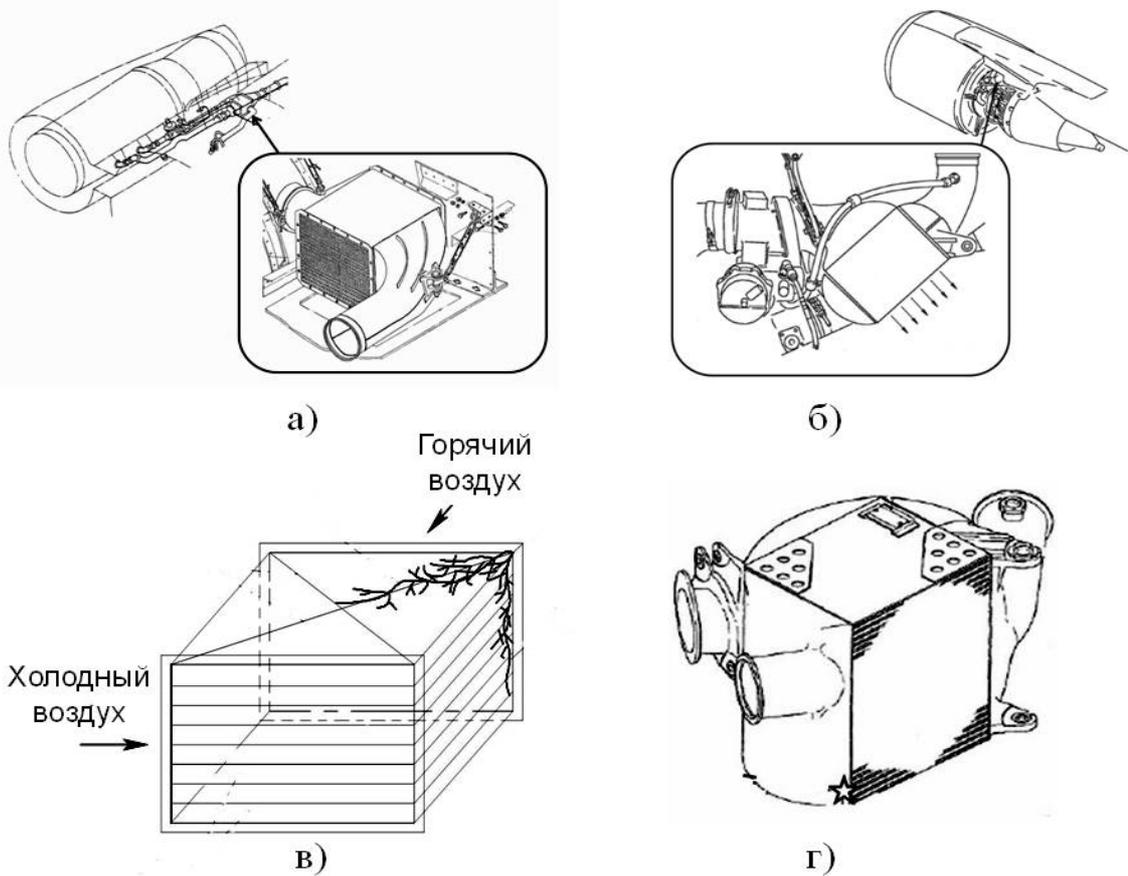


Рис. 2. Компоновка ПТО СКВ в пилоне двигателя ЛА и примеры усталостного разрушения ПТО: а), в) самолеты семейства Ту 154; б), г) самолеты семейства Boeing 737.

В результате анализа установлено, что периодический нагрев и охлаждение ПТО СКВ ЛА при каждом цикле «взлёт/посадка» приводят к усталостному разрушению конструкции. Известными способами повышения ресурса ПТО СКВ ЛА является использование конструкционных материалов с высокими жаропрочными свойствами и/или введение в конструкцию ПТО дополнительных

силовых элементов («обручей жесткости»). Однако такие способы не затрагивают саму причину разрушения конструкции и приводят к повышению стоимости и усложнению/утяжелению ПТО СКВ ЛА. Приводится обзор известных методов расчета и проектирования компактных пластинчато-ребристых теплообменников и формулируются цели и задачи исследования.

**Во второй главе** описывается используемая методика расчета процесса теплопередачи, и определения температуры теплообменной поверхности КПРТ.

В общем виде, процесс теплопередачи при конвективном теплообмене через стенку описывается системой уравнений:

$$\rho_1 \left( w_{x1} \frac{\partial i_1}{\partial x_1} + w_{y1} \frac{\partial i_1}{\partial y_1} \right) = \frac{\partial}{\partial y_1} \left( \frac{\lambda_1}{c_{p1}} \frac{\partial i_1}{\partial y_1} \right), \quad (1)$$

$$\rho_2 \left( w_{x2} \frac{\partial i_2}{\partial x_2} + w_{y2} \frac{\partial i_2}{\partial y_2} \right) = \frac{\partial}{\partial y_2} \left( \frac{\lambda_2}{c_{p2}} \frac{\partial i_2}{\partial y_2} \right), \quad (2)$$

$$-\frac{\lambda_1}{c_{p1}} \frac{\partial i_1}{\partial y_1} = -\frac{\lambda_2}{c_{p2}} \frac{\partial i_2}{\partial y_2}, \quad (3)$$

где: 1 – горячий теплоноситель; 2 – холодный теплоноситель;  $w_x$  – скорость теплоносителя в направлении параллельном поверхности теплообмена;  $w_y$  – скорость теплоносителя в направлении нормальном к поверхности теплообмена;  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $i$  – энтальпия теплоносителя;  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя;  $c_p$  – теплоемкость теплоносителя.

Физический смысл уравнений (1) и (2) заключается в том, что количество тепла, отданное теплоносителем (левая часть), равно количеству тепла, поступившему в процессе теплоотдачи на пластину (правая часть). Физический смысл уравнения (3) состоит в том, что тепловой поток от горячего теплоносителя к пластине равен тепловому потоку, поступающему от пластины к холодному теплоносителю.

Система уравнений (1)...(3) решалась численным методом. Для этого вместо бесконечно малых  $dx$ ,  $dy$  использовались конечные разности  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , (рис.3), не-

прерывные функции и их производные были заменены на сеточные (дискретные) уравнения.

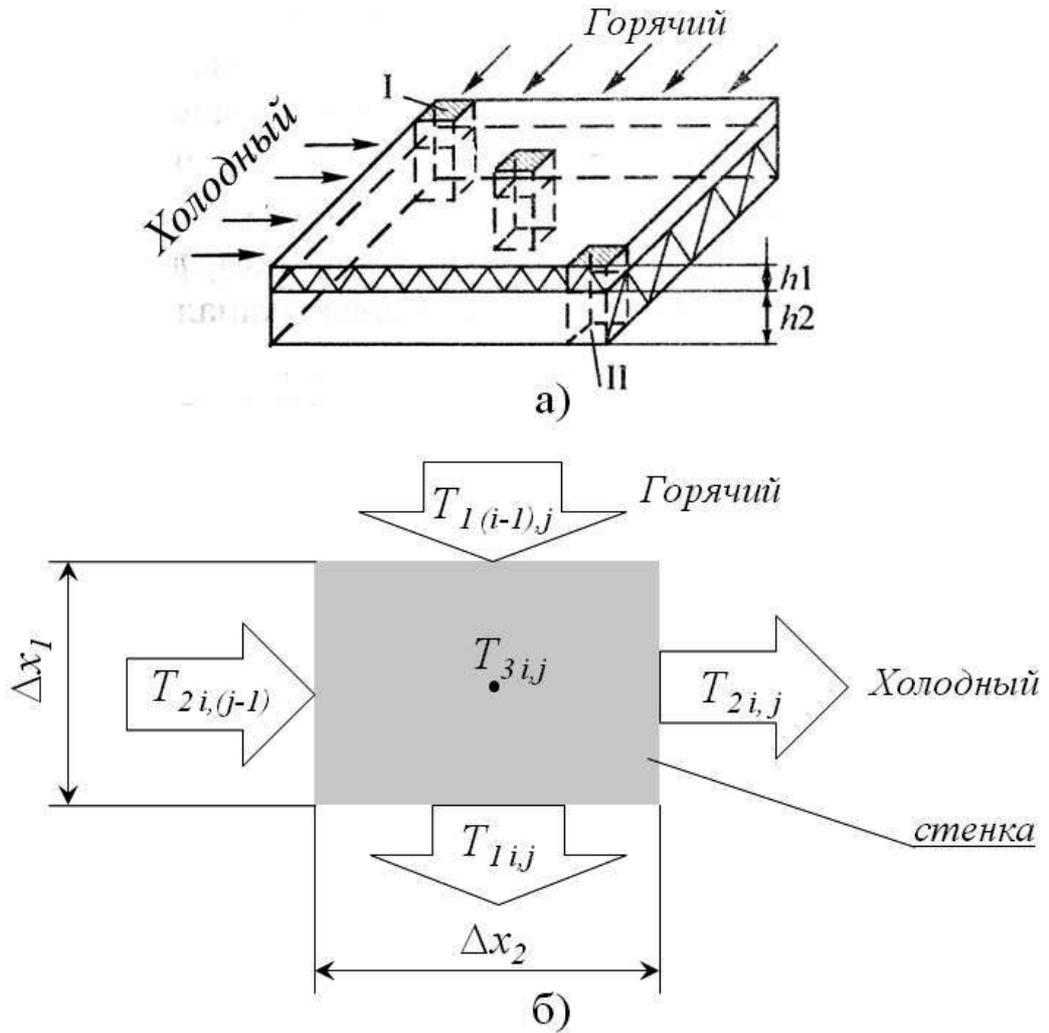


Рис. 3. а) Двухмерная модель для расчета локальной теплопередачи:  $h1$  – высота оребрения со стороны горячего теплоносителя;  $h2$  высота оребрения со стороны холодного теплоносителя;  $\Delta x_1 \Delta x_2$  – расчетный элемент; I – первый расчётный элемент, II – последний расчётный элемент б) расчетный элемент.

После преобразований уравнений (1)...(3) сеточные уравнения для расчета теплопередачи через элементарный участок теплообменной поверхности  $\Delta x_1 \Delta x_2$  (рис. 3) принимают следующий вид:

$$\rho_{1i,j} w_{1i,j} c_{p1i,j} (T_{1i-1,j} - T_{1i,j}) \Delta x_1 h_1 = \alpha_{1i,j} \varphi_{1i,j} (\bar{T}_{1i,j} - T_{3i,j}) \Delta x_1 \Delta x_2 \quad (4)$$

$$\rho_{2i,j} w_{2i,j} c_{p2i,j} (T_{2i,j} - T_{2i,j-1}) \Delta x_2 h_2 = \alpha_{2i,j} \varphi_{2i,j} (T_{3i,j} - \bar{T}_{2i,j}) \Delta x_1 \Delta x_2 \quad (5)$$



стоятельный «теплообменник» (рис. 4). Проверка достоверности модели проводится путем сравнения полученных результатов с известными расчетными и экспериментальными данными в результате установлено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Проведена количественная оценка применимости допущения об отсутствии теплопроводности вдоль поверхности теплообмена для целей проектирования ПТО СКВ ЛА. Показано, что в существующих и перспективных вариантах теплообменника тепловой поток в продольном направлении не может превышать 4 % теплового потока между теплоносителями, поэтому допущение об отсутствии теплопроводности вдоль поверхности теплообмена является обоснованным.

**В третьей главе** рассмотрены способы управления температурой теплообменной поверхности за счет использования переменного отношения термических сопротивлений со стороны горячего и холодного теплоносителя. Термическое сопротивление теплообменной поверхности в стационарном режиме определяется уравнением:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2} + \frac{\delta}{\lambda F_1} \quad (6)$$

Если термические сопротивления  $R_1, R_2$  в уравнении одинаковы, то температура стенки близка к средней между температурами горячего и холодного теплоносителей, если со стороны одного из теплоносителей термическое сопротивление больше, то температура стенки смещается в сторону теплоносителя, термическое сопротивление со стороны которого меньше, что верно как для теплообменника в целом, так и для каждого элементарного участка теплообменной поверхности  $\Delta x_1 \Delta x_2$ . Для анализа влияния термического сопротивления на распределение температуры по теплообменной поверхности используется безразмерный параметр  $RR$ :

$$RR = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2} = \frac{Re_1 \varphi_1}{Re_2 \varphi_2} = R_{Re} R_\varphi \quad (7)$$

Где:  $Re_1, Re_2$  – числа Рейнольдса, определяющие режимы течения теплоносителей;  $\varphi_1, \varphi_2$  – коэффициенты оребрения теплообменной поверхности, отношение

полной площади теплообменной поверхности к площади разделительной пластины (стенки);  $R_{Re}$  – режимный фактор, учитывающий соотношение параметров течения теплоносителей;  $R_{\varphi}$  – геометрический фактор, учитывающий соотношение площадей оребрений. Физический смысл  $RR$  – во сколько раз термическое сопротивление со стороны холодного теплоносителя больше сопротивления со стороны горячего теплоносителя. Значения  $Re_1$ ,  $Re_2$  и  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , можно задавать на начальной стадии проектирования, до определения коэффициентов теплоотдачи и площади теплообменной поверхности, что позволяет проектировать КПРТ с любым значением  $RR$ . В главе проводится анализ влияния геометрического  $R_{Re}$  и режимного  $R_{\varphi}$  факторов на температуру теплообменной поверхности и гидравлическое сопротивление теплообменника (рис. 5, 6).

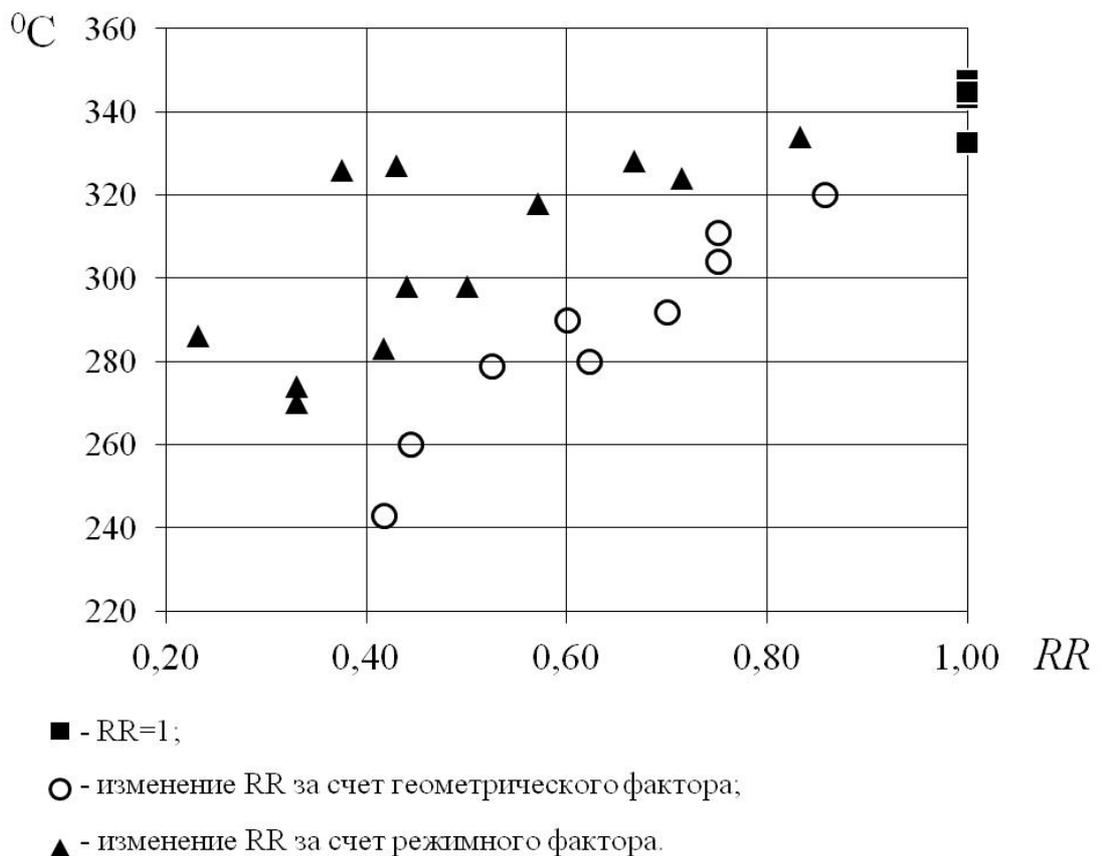


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры теплообменной поверхности от отношения термических сопротивлений.

Установлено, что для управления распределением температуры по теплообменной поверхности предпочтительнее использовать геометрический фактор, по-

сколькo его влияние на температуру проявляется сильнее, чем влияние режимного фактора и не сопровождается увеличением гидравлического сопротивления в тракте горячего теплоносителя.

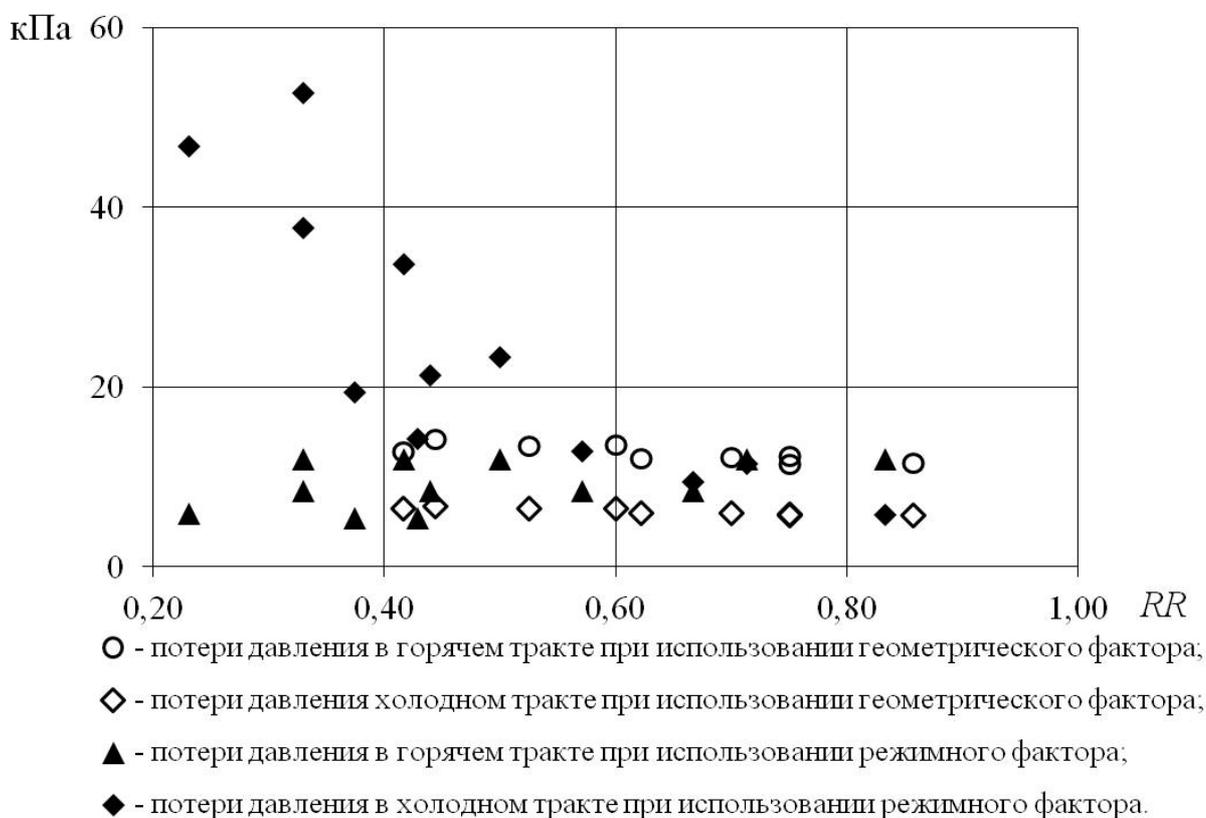


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления матрицы теплообменника от отношения термических сопротивлений.

В четвертой главе приводятся результаты исследования распределения температуры по теплообменной поверхности и теплонапряженного состояния конструкции ПТО СКВ ЛА при переменном соотношении термических сопротивлений. Изменение распределения температуры по теплообменной поверхности достигается за счет использования геометрического фактора  $R_{\phi}$ . Параметры оребрения подбирались таким образом, чтобы среднее значение параметра  $RR$  изменялось в пределах от 0.3 до 1.2. При этом значения параметра  $RR$  для отдельных участков теплообменной поверхности составляли от 0.15 до 1.55. В результате выполнен расчет 34 различных вариантов конструкций теплообменников при одинаковых условиях работы (расход, температура, давление и влагосодержание теплоносителей на входе, максимальная температура горячего теп-

лоносителя на выходе). Для каждого из вариантов определяется распределение температуры по теплообменной поверхности (рис.7).

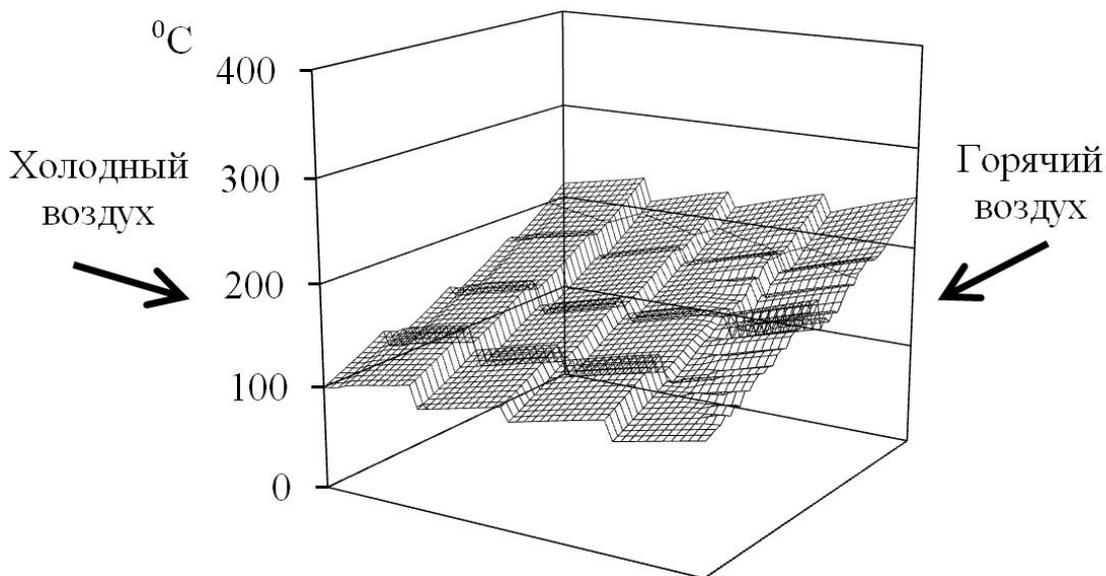


Рис. 7. Пример расчета распределения температуры по теплообменной поверхности для КПРТ с переменным оребрением по горячему и холодному тракту.

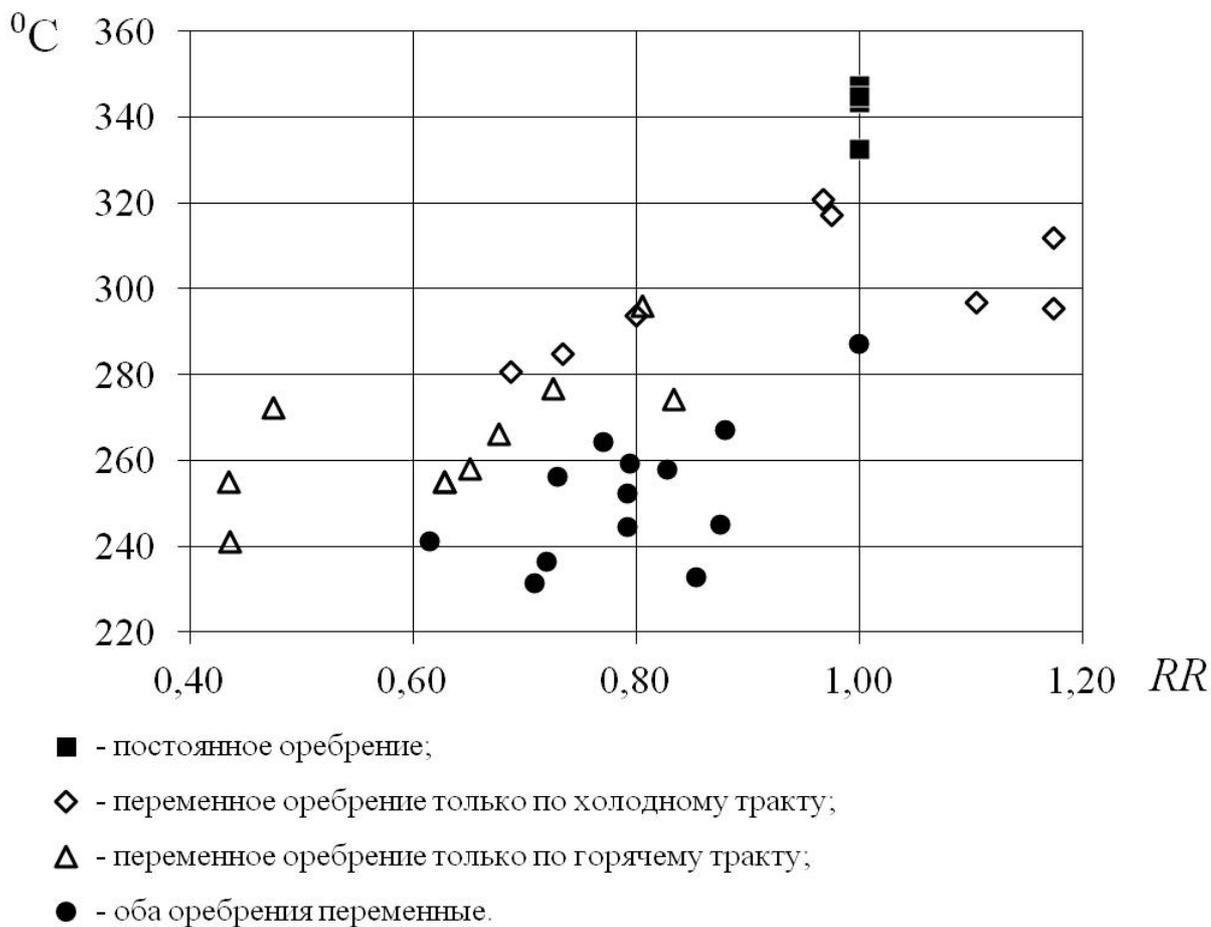


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры поверхности теплообмена от отношения термических сопротивлений для различных вариантов конструкции КПРТ.

Для количественной оценки влияния переменного отношения термических сопротивлений на распределение температуры по теплообменной поверхности, полученные данные обобщаются в виде зависимости максимальной температуры теплообменной поверхности от  $RR$  (рис. 8). Показано, что одновременное использование переменного оребрения в горячем и холодном трактах КПРТ приводит к выравниванию температуры и к существенному (более чем на 60 %) снижению максимальной температуры теплообменной поверхности по сравнению с исходным вариантом конструкции теплообменника с постоянным оребрением.

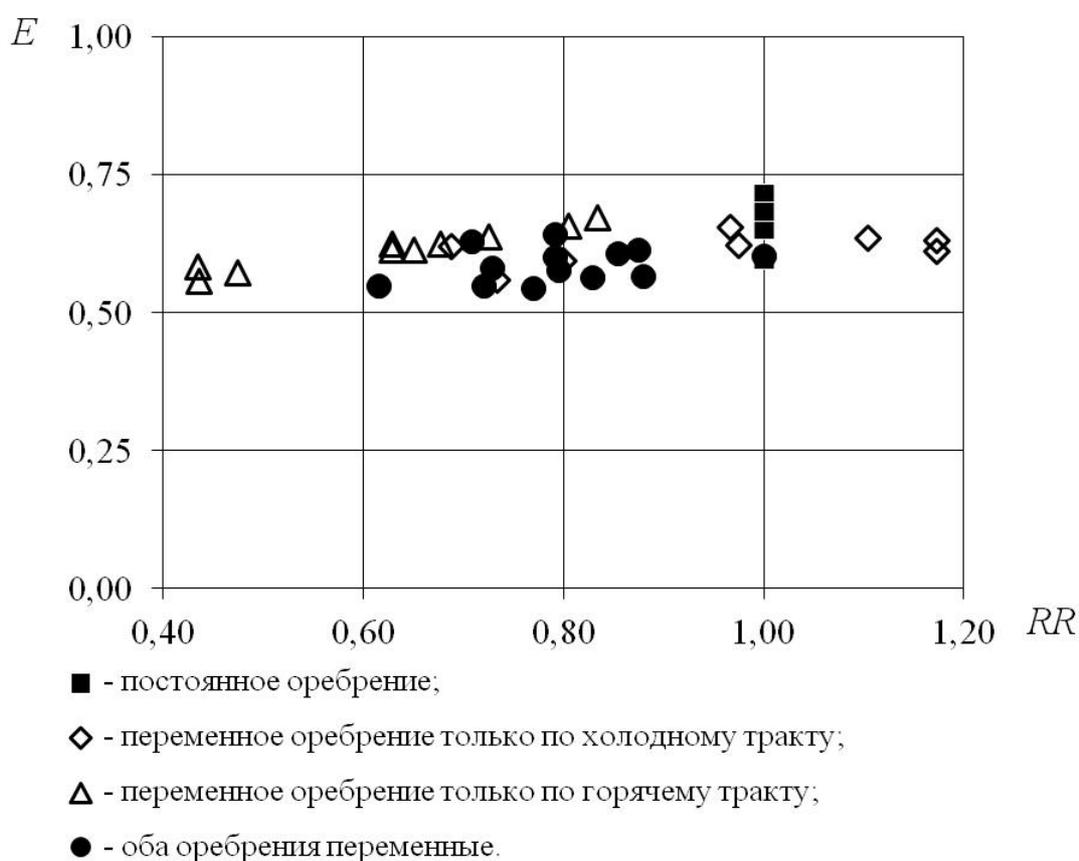


Рис. 9. Термодинамическая эффективность КПРТ с различными соотношениями термических сопротивлений.

Для оценки влияния использования переменного оребрения на массогабаритные характеристики КПРТ используется значение объема пакета оребренных пластин, как основного и наиболее массивного элемента конструкции теплообменника. Выявлено, что использование переменного оребрения не влияет существенно на массогабаритные характеристики теплообменника (объем пакета

оребранных пластин изменяется не более чем на 4 % по сравнению с аналогичными теплообменниками с постоянным оребрением).

Для сравнения между собой тепловой эффективности различных вариантов конструкции теплообменника использовался показатель термодинамической эффективности:

$$E = \frac{G_{\Gamma} C p_{\Gamma} (T_{\Gamma}^{\text{BX}} - T_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}})}{(GCp)_{\min} (T_{\Gamma}^{\text{BX}} - T_{\text{X}}^{\text{BX}})} \quad (8)$$

Очевидно (рис. 9), что использование переменного оребрения не оказывает существенного негативного влияния на термодинамическую эффективность КПРТ. В главе проводится оценка влияния перераспределения температуры по поверхности теплообмена на теплонапряженное состояние конструкции и ресурс теплообменника, для чего на основе полученного распределения температуры теплообменной поверхности определяются максимальные эквивалентные термические напряжения конструкции путем численного моделирования методом конечных объемов с помощью программного комплекса STAR CCM+ компании CD-Adapco. Расчеты выполнены для шести теплообменников с одинаковыми размерами теплообменной поверхности (пластины) 157x166 мм. Один теплообменник с постоянным оребрением  $RR=1$  и 5 теплообменников с переменным оребрением (среднее значение  $RR$  от 0.71 до 1.0). В качестве конструкционного материала была выбирается сталь 12X18H10T, которая применяется для изготовления изделия ВВР 5307 АТ, используемого в качестве ПТО СКВ самолета Ту-154. Согласно полученным данным, использование режимного фактора для уменьшения максимальной температуры теплообменной поверхности позволяет снизить эквивалентные термические напряжения на 37 %. Оценка ресурса ПТО СКВ ЛА проводится на основе определения максимального числа циклов нагружения по методике расчета на прочность при малоцикловых нагрузках по ГОСТ 52857-6. Один полет соответствует одному циклу («запуск двигателя, взлет» = «нагрев», «выключение двигателя, стоянка» = «охлаждение»). Средняя продолжительность полета принимается 2.65 часа. В итоге определен ресурс различных вариантов конструкций ПТО СКВ ЛА спроектиро-

ванных с использованием переменного оребрения для обеспечения заданного распределения температуры по теплообменной поверхности (рис. 10).

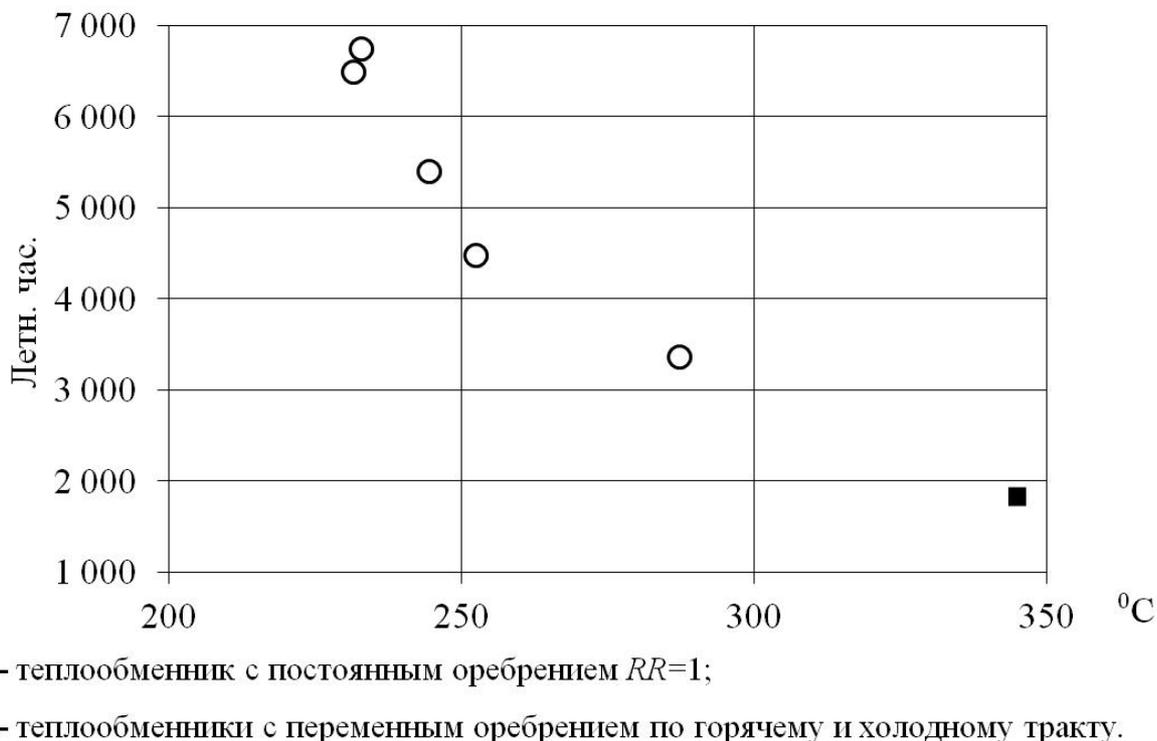


Рис. 10. Зависимость ресурса ПТО СКВ ЛА от максимальной температуры теплообменной поверхности.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что применение переменного оребрения позволяет увеличить ресурс до 4 раз по сравнению с теплообменниками с постоянным оребрением.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе:

1. Обоснован, развит и проверен метод расчета процесса локальной теплопередачи в компактном перекрестно-точном теплообменнике, учитывающий переменные термические сопротивления по поверхности теплообмена в горячем и холодном трактах. Подтверждена справедливость допущения об отсутствии продольной теплопроводности для расчетов ПТО СКВ ЛА (тепловой поток вдоль теплообменной поверхности не превышает 4 % от теплового потока между теплоносителями). Проведена проверка достоверности методики путем сравнения с известными экспериментальными и расчетными данными. Установлено, что изменение термических сопротивлений по длине горячего или холодного тракта позволяет существенно (более чем на 100 %) снизить перепад

температур вдоль теплообменной поверхности. Изменение термических сопротивлений одновременно по длине горячего и холодного тракта приводит к снижению максимального значения температуры теплообменной поверхности до 60 % и снижению перепада температур по теплообменной поверхности до 200 %.

2. Обоснован, разработан и проверен метод управления температурой теплообменной поверхности компактного теплообменника. Предложено решение задачи управления температурой теплообменной поверхности путем создания конструкции компактного теплообменника с переменным отношением термических сопротивлений в горячем и холодном трактах за счет изменения геометрических параметров оребрения по длине каналов для получения требуемого распределения температуры. При этом эффективность метода оценивается путем сравнения расчетных распределений температур теплообменной поверхности с требуемыми значениями из эксплуатационных особенностей или из дополнительных ограничений (термические напряжения). Выполнен комплекс исследований и установлены основные закономерности влияния отношения термических сопротивлений на теплофизические параметры и эксплуатационные свойства компактных теплообменников.

3. Предложены и обоснованы варианты реализации конструкции одноходового компактного первичного теплообменника, позволяющие многократно повысить его ресурс. Показано, что в случае уменьшения отношения термических сопротивлений одновременно по горячему и холодному тракту в диапазоне значений 0.35.....1.3 за счет изменения геометрических параметров оребрения можно существенно (в 2...4 раза) уменьшить неравномерность распределения температуры по теплообменной поверхности в продольном направлении, а также понизить максимальную температуру теплообменной поверхности до 60 % по сравнению с традиционными методами конструирования первичных теплообменников при сохранении других эксплуатационных характеристик теплообменника неизменными. Показано, что это позволяет улучшить эксплуатационные свойства работы материала теплопередающей поверхности и увеличить ре-

курс ПТО СКВ ЛА до 400 % по сравнению с исходным вариантом конструкции, при этом установлено, что использование переменного оребрения не сказывается существенно на термодинамической эффективности и размерах ПТО СКВ ЛА.

4. На основе предложенного подхода разработаны алгоритм и методика расчета для пакета прикладных программ для проектирования компактных теплообменников и оптимизации их параметров. Результаты исследований использовались при разработке перспективных образцов компактных теплообменников, в частности для системы кондиционирования воздуха нового поколения, примененной на самолете Ту-204. Разработанный методический подход и пакет программ и внедрен в учебный процесс НГТУ.

**Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

*Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК*

1. Чичиндаев А.В. Влияние переменного отношения термических сопротивлений на распределение температур в компактном пластинчато-ребристом теплообменнике / А. В. Чичиндаев, И. Г. Диомидов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 4. – С. 197–201.

*Публикации в журналах и сборниках трудов*

2. Чичиндаев А. В. Оптимизация параметров первичного теплообменника авиационной СКВ / А. В. Чичиндаев, И. Г. Диомидов // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 4. – С. 41–46.

3. Чичиндаев А. В. Оптимизация эксплуатационных параметров компактного теплообменника при наличии температурных напряжений / А. В. Чичиндаев, И. Г. Диомидов // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2008. – Вып. 12. – С. 318–329.

4. Диомидов И. Г. Оценка влияния продольной теплопроводности стенки на процесс теплопередачи в компактном теплообменнике / И. Г. Диомидов, А. В.

Чичиндаев // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2009. – Вып. 14. – С. 172-178.

5. Диомидов И. Г. Исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на поля температур в первичном теплообменнике / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2011. – Вып. 16. – С. 213-218.

6. Диомидов И. Г. Особенности влияния переменного отношения термических сопротивлений на температурные напряжения в первичном теплообменнике / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – Вып. 17. – С. 201-207.

7. Диомидов И. Г. Анализ эффективности применения метода переменного отношения термических сопротивлений в первичном теплообменнике / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – Вып. 17. – С. 174-190.

*Материалы международных и всероссийских научных конференций*

8. Чичиндаев А.В. Особенности моделирования и исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на процесс теплопередачи в первичном теплообменнике / А. В. Чичиндаев, И. Г. Диомидов // Тр. Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. – 625-627.

9. Диомидов И. Г. Исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на процесс теплопередачи в первичном теплообменнике / И. Г. Диомидов // Тр. Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 184-188.

10. Диомидов И. Г. Влияние процесса теплопередачи на термические напряжения в первичном теплообменнике системы кондиционирования воздуха / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Матер. Всероссийской научно-технической кон-

ференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – С. – 104-107.

11. Диомидов И. Г. Влияние продольной теплопроводности стенки на процесс теплопередачи в компактном теплообменнике / И. Г. Диомидов // Матер. Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. – 181-183.

12. Диомидов И. Г. Особенности теплопередачи в компактном теплообменнике при изменении термических сопротивлений в горячем и холодном трактах / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Тр. Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 189-191.

13. Диомидов И. Г. Влияние переменного отношения термических сопротивлений на температурные напряжения в первичном теплообменнике / И. Г. Диомидов, А. В. Чичиндаев // Труды XIII всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 201-205.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс (383) 346-08-57  
формат 60 X 84/16 объем 1,5 п.л. тираж 100 экз.  
Заказ № 453 подписано в печать 14.03.13 г.