

На правах рукописи

ФЛЕЙТЛИХ

Борис Борисович

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА
СРЕДНЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРА ПРИ
ОДНОХОДОВОМ ПЕРЕКРЕСТНОМ ТОКЕ С
НЕПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИСЯ СРЕДАМИ**

Специальность 01.04.14

Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Москва — 2011

Работа выполнена на кафедре авиационной и ракетно-космической теплотехники Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук,
Лобанов Игорь Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Пелевин Фёдор Викторович
доктор технических наук,
доцент Дедов Алексей Викторович

Ведущая организация: НПО «Сатурн»

Защита состоится «6» июня 2011 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Автореферат разослан « » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.08
д.т.н, проф.



Ю.В. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время в авиа- и ракетостроении одним из требований к узлам и агрегатам, используемым в конструкции, является компактность, что связано с необходимостью рационального увеличения массы полезного груза летательных аппаратов.

В составе систем смазки, жидкостных систем охлаждения, систем кондиционирования и топливных систем летательных аппаратов используются теплообменные аппараты. Условия эксплуатации теплообменников различных систем требуют надежности при различных режимах работы, простоты эксплуатации, рационально максимальной интенсификации теплообмена, минимальных гидравлических потерь, высокой компактности и минимальной удельной массы.

Высокие требования, предъявляемые к теплообменным аппаратам, применяемым в различных областях техники, послужили толчком к модификации существующих и разработке новых конструкций теплообменных аппаратов. Самыми распространенными в летательных аппаратах и других транспортных средствах являются различные конструкции компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов. Преимуществами пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов являются: компактность, малая масса, независимость поверхностей теплообмена, что позволяет выбрать оптимальное оребрение для каждого теплоносителя и возможность реализации любой схемы течения теплоносителей.

Расчет различных конструкций пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов представляет собой сложный многоитерационный комплекс переменных и выражений, объединенный общим алгоритмом, методикой вычислений, обладающий высокой трудоемкостью и большими временными затратами. При ручных вычислениях создаются дополнительные погрешности

ввиду использования методов расчета с низкой точностью, в частности графоаналитических.

При расчете пластинчато-ребристого теплообменного аппарата, в котором реализован перекрестный ток с неперемешивающимися теплоносителями необходимо производить расчет величины среднего температурного напора, что в описанном случае является сложной вычислительной задачей. Для решения этой задачи с заданной точностью необходимо точное аналитическое решение задачи Нуссельта о температурном напоре при чисто перекрестном токе.

Целью диссертационной работы является совершенствование существующих методов расчета, используемых при разработке высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

Для достижения цели проводится:

1. Комплексная алгоритмизация существующих методик конструкторского теплогидравлического расчета высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов;

2. Алгоритмизация критически проанализированных существующих решений задачи распределения температур в одноходовом перекрестноточном рекуператоре с неперемешивающимися средами;

3. Получение аналитических решений задачи распределения температур при чисто перекрестном токе, выгодно отличающихся от существующих более высокой точностью и сходимостью.

4. Применение полученных аналитических решений в разработанных модульных алгоритмах и программах конструкторского теплогидравлического расчета теплообменных аппаратов с оребренными поверхностями.

Научная новизна работы.

Получено точное аналитическое решение задачи полного распределения температур в одноходовом перекрестноточном рекуператоре с

неперемешивающимися средами без дополнительных допущений, применяемых в предыдущих аналогичных работах.

Разработаны алгоритмы и программы теплогидравлического расчета компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов, отвечающие современным требованиям к системам автоматизированного проектирования теплообменного оборудования.

Практическая значимость работы.

Разработанные алгоритмы и программы теплогидравлического расчета высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов необходимо использовать при моделировании новых и модернизации существующих конструкций пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

По результатам работы приведены рекомендации по составу оснастки в качестве базы для алгоритмизации конструкторского теплогидравлического расчета, составлению отдельных алгоритмов и программ, ходу расчета и численному моделированию.

По результатам работы получены 4 авторских свидетельства Объединенного фонда электронных ресурсов науки и образования ИНИМ РАО Российской Федерации.

Защищаемые положения.

На защиту выносятся:

1. Аналитическое решение задачи распределения температур в одноходовом перекрестноточном рекуператоре с неперемешивающимися средами без дополнительных допущений, представленных в предыдущих аналогичных работах.

2. Алгоритмы и программы по существующим методикам теплогидравлического расчета высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

3. Результаты алгоритмизации теплогидравлического расчета высокоэффективных пластинчато-ребристых аппаратов с применением полученного аналитического решения задачи распределения температур.

Достоверность полученных результатов.

Определяется надежностью проведенных экспериментальных исследований в авиационном и транспортном машиностроении и подтверждена адекватностью теоретических положений исследований, содержащихся в работе.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи, разработке метода и алгоритма ее решения, проведении численного анализа исследованных процессов, обработке и обобщении результатов теоретических исследований, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и заключения по диссертации.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседании кафедры "Авиационно-космической теплотехники" МАИ (ГТУ) и на следующих конференциях: 5-ая Российская национальная конференция по теплообмену (г. Москва, 2010), 9-ая международная научная конференция «Авиация и Космонавтика» (г. Москва, 2010), XXXV Академические чтения по космонавтике «Королёвские чтения» (г. Москва, 2011).

Также работа проходила апробацию на конкурсе научных работ молодых ученых, 2-ом межотраслевом молодёжном научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2010), на котором была удостоена диплома третьей степени.

Публикации.

Основные результаты работы отражены в двух статьях, опубликованных в журналах «Вестник МАИ» и «Теплоэнергетика», входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, в четырех тезисах 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2010), 9-ой международной научной конференции «Авиация и Космонавтика» (г. Москва, 2010), XXXV Академических чтений по космонавтике «Королёвские чтения» (г. Москва, 2011), 2-ого межотраслевого молодёжного научно-технического форума «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2010), а также в пяти статьях журналов «Аспирант и соискатель» и «Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование».

По результатам работы получены четыре авторских свидетельства Объединенного фонда электронных ресурсов науки и образования ИНИМ РАО Российской Федерации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Материал изложен на 105 листах, включает 29 рисунков, 8 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 92 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, описывается краткое содержание каждой из глав.

В **первой главе** рассматриваются общие аспекты разработки теплообменных аппаратов и актуальность исследования, а также математического моделирования различных конструкций и поверхностей

компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов (КПРТА). Приводится классификация современных теплообменных поверхностей КПРТА и их конструктивные и теплогидравлические характеристики.

Дан общий анализ современных методов расчета теплообменных аппаратов, рассмотрены аспекты разработки САПР теплообменного оборудования.

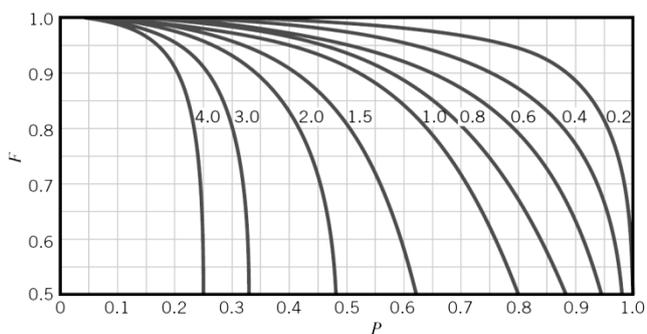


Рис. 1. Номограмма определения поправок к среднелогарифмическому температурному напору на перекрестный ток.

Приводятся современные методы расчета среднего температурного напора в КПРТА при различных схемах течения теплоносителей, систематизированы подходы к расчету среднего температурного напора в одноходовом перекрестном токе с неперемешивающимися средами.

Анализ приведённого обзорного материала позволил поставить задачу теоретического исследования данной диссертационной работы.

Во **второй главе** проведено математическое моделирование задачи о распределении температур при перекрестном токе теплоносителей.

При конструкторском теплогидравлическом расчете теплообменного аппарата необходимо рассчитывать значение величины среднего температурного напора. Определение значения величины среднего температурного напора во многих случаях осложнено как техническими условиями испытания теплообменного аппарата, а также низкой точностью измерительной аппаратуры, так и многоитерационными математическими расчетами при обработке экспериментальных данных.

На данный момент в ряде литературных источников предлагается использование графоаналитического метода (Рис. 1) расчета значения величины среднего температурного напора для одно- и многоходовых

теплообменных аппаратов с прямоточной, противоточной, перекрестноточной и смешанной схемой течения теплоносителей.

Графоаналитический метод предполагает использование графиков и таблиц для определения поправки к величине среднелогарифмического температурного напора, определенной по формуле, известной как уравнение Грасгофа.

$$\Delta\tau = \frac{(T_{11} - T_{22}) - (T_{12} - T_{21})}{\ln \left[\frac{(T_{11} - T_{22})}{(T_{12} - T_{21})} \right]} \cdot F \quad (1)$$

Для каждой из схем течения теплоносителей, с учетом количества ходов, в указанных источниках предлагается обобщенная расчетная формула для расчета среднего температурного напора.

Использование данных графоаналитических методов приводит к значительным погрешностям в точности определения величины среднего температурного напора графоаналитическим методом мала, что, в свою очередь, приводит к неизбежным погрешностям и дополнительным допущениям при комплексном расчете теплообменного аппарата. Последнее требует разработки точного метода расчета, соответствующего актуальной точности измерения температур потоков теплоносителей, равной ± 0.02 °С.

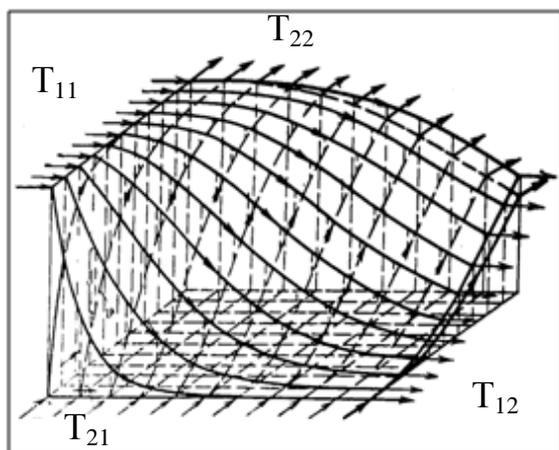


Рис. 2. Распределение температур при чисто перекрестном токе теплоносителей с двух сторон плоской пластины.

Проблема расчета значения величины среднего температурного напора при перекрестном токе в одноходовом по обоим полостям теплообменном аппарате с неперемешивающимися теплоносителями была впервые обозначена и решена Нуссельтом (Рис. 2).

Сложность расчета среднего температурного напора для такого вида

поверхностей заключалась в отсутствии математического аппарата для

определения температурного поля, создаваемого перекрестными струями теплоносителей в каналах поверхности теплообмена.

Дифференциальные уравнения, детерминирующие распределение температур в перекрёстноточном рекуператоре при чисто перекрёстном токе:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi} = \vartheta' - \vartheta; \\ \frac{\partial \vartheta'}{\partial \xi'} = \vartheta - \vartheta', \end{cases} \quad (2)$$

где $\xi = \frac{kL}{C}x$; $\xi' = \frac{kL}{C'}x'$ — безразмерные переменные; C и C' — теплоёмкости массовых расходов теплоносителей; k — коэффициент теплопередачи.

Система дифференциальных уравнений в частных производных (2) формально совпадает с системой уравнений для распределения температур в регенераторах при соответственно изменённом смысле переменных, если:

- а) вместо температуры насадки Θ используется температура ϑ' ;
- б) вместо введённого приведённого времени η используется безразмерная переменная ξ' .

Следовательно, при соответственном вышеуказанном изменении смысла переменных будет справедливо точное аналитическое решение для первоначального разогрева насадки регенератора, при последующем его преобразовании.

На основании произведенных последовательных преобразований выражений для насадки регенератора были получены соответствующие выражения для перекрестно-точного рекуператора, позволяющие определить средний температурный напор при чисто перекрестном токе с

неперемешивающимися средами как для конструкторского (3), так и для поверочного расчета (4):

$$\Delta\vartheta_M = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta'_1)}{\left(\frac{kF}{C}\right)\left(\frac{kF}{C'}\right)} e^{-\frac{kF}{C}} \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^p \frac{\left(\frac{kF}{C'}\right)^{m+p+1} \left(\frac{kF}{C}\right)^n}{n! p! m! (m+p+1)}. \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, F - полная площадь теплообменной поверхности; C, C' - теплоёмкость теплоносителей, $\vartheta_1, \vartheta'_1$ – температура нагревающего и нагреваемого теплоносителя на входе.

$$1 = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^{n-m+p}}{(n-m)! (m!)^2 p! (m+p+1)} \frac{\left[\frac{(\vartheta'_2 - \vartheta'_1)}{(\vartheta_1 - \vartheta'_1)}\right]^{m+p}}{\left[\frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{(\vartheta_1 - \vartheta'_1)}\right]^n \left[\frac{(\vartheta_1 - \vartheta'_1)}{\Delta\vartheta_M}\right]^{m+p+n+1}}, \quad (4)$$

где ϑ_1, ϑ_2 – температура нагревающего теплоносителя на входе и выходе, $\vartheta'_1, \vartheta'_2$ – температура нагреваемого теплоносителя на входе и выходе соответственно.

В завершении главы обосновываются основные преимущества полученного аналитических решений по отношению к существующим, приводятся выводы и рекомендации по их применению при теплогидравлическом расчете теплообменного оборудования. Ставятся цели исследования алгоритмизации полученных решений.

В **третьей главе** рассматривается общая методика алгоритмизации многоитерационного теплогидравлического расчета компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

На основе опыта предыдущих разработок САПР для теплообменного оборудования приводятся конкретные практические рекомендации по алгоритмизации теплогидравлического расчета. В качестве оснастки предлагается конкретный программный комплекс кроссплатформенного свободно-распространяемого программного обеспечения, позволяющий решать

задачи алгоритмизации, обеспечивая при этом мобильность оператора и возможность распределения нагрузки при расчете.

Программы теплогидравлического расчета состоят из отдельных модулей, что позволяет собирать необходимый для конкретной конструкции функционал. Используемая в комплексе оснастки база данных MySQL позволяет осуществить задачи хранения и аккумуляции результатов расчета, теплофизических свойств материалов конструктивных элементов теплообменного аппарата, теплофизических свойств теплоносителей. Разработка алгоритмов и программ на языке программирования PHP, предназначенном для работы в вычислительных сетях, позволило создать структурированную систему с такими особенностями как: адаптивный ввод данных и систематизированный вывод результатов расчета, возможность удаленного доступа, криптозащита кода программ, мобильность, кроссплатформенность.

В части апробации были произведены расчеты теплообменных аппаратов для заданных режимов работы. Результаты расчета программы соответствуют результатам ручного счета за вычетом погрешностей ручного счета при использовании графоаналитических методов определения различных величин (в том числе определение теплофизических свойств теплоносителей и материалов и поправки при расчете среднего температурного напора).

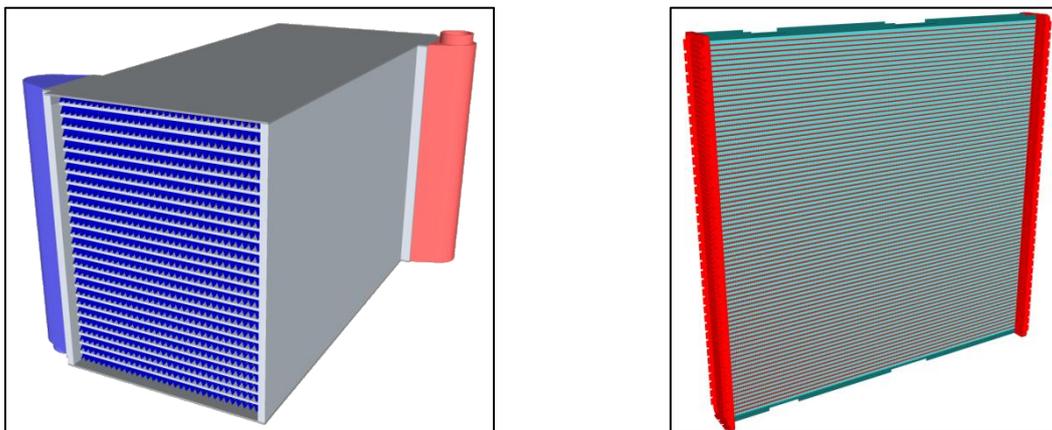


Рис. 3. Общий вид компактных перекрестно-точных теплообменных аппаратов (пластинчато-ребристого и трубчато-ленточного).

Приведены современные конструкции (Рис. 3) компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов (КПРТА) и общий ход их теплогидравлического расчета.

Разработанные с помощью свободно распространяемого программного обеспечения Google Sketchup v.7 по стандартам международной системы CAD трёхмерные модели КПРТА могут быть использованы для моделирования процессов теплопередачи и теплообмена и при гидравлических и прочностных аналитических испытаниях в системах CAE, таких как ANSYS, CFDDesign, FlowDesign, Fluent. Модели совместимы со всеми известными CAD системами - Unigraphics, CATIA, SolidWorks, Autodesk Inventor. Недостатком такого подхода является большое время расчета модели ввиду наличия большого количества конструктивных элементов.

В ходе расчета приводится блок-схема расчета среднего температурного напора для перекрестного тока теплоносителей с неперемешивающимися средами по двойному бесконечному медленно-сходящемуся ряду, представленному Смитом (Рис. 4).

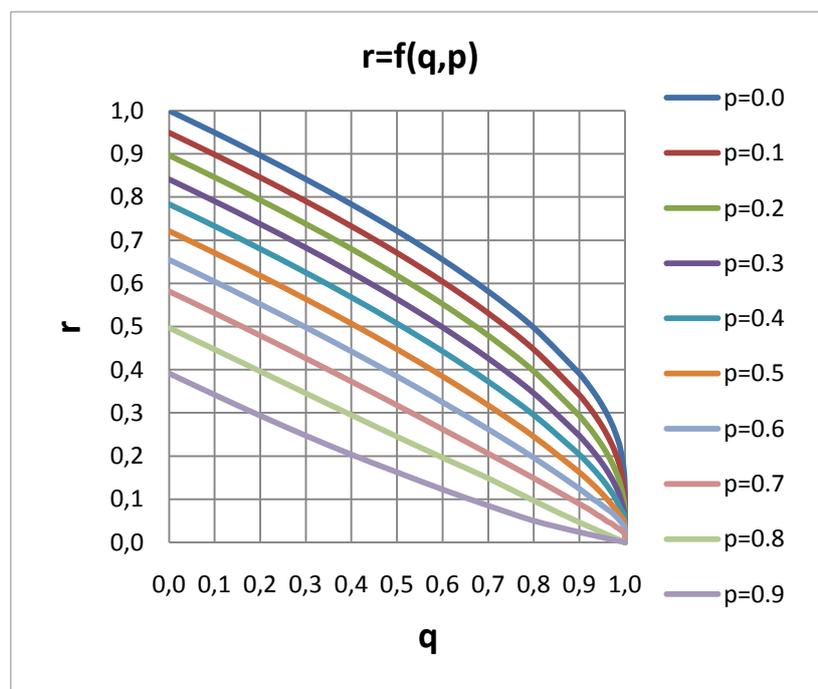


Рис. 4. Верификация алгоритмизации метода Смита построением аналогичной номограммы

На основе конструкции компактного трубчато-ленточного теплообменного аппарата приводится полный методический расчет. Расчет производится по каждому направлению тока теплоносителей, процесс расчета описан подробными блок-схемами. По окончании описания хода расчета приводится таблица окончательных результатов теплогидравлического расчета, необходимая для анализа влияния заданных характеристик конструкции теплообменного аппарата при заданных режимных параметрах работы на заданные допустимые нормы теплосъема и других показательных величин.

Завершают главу основные выводы и практические рекомендации по алгоритмизации теплогидравлического расчета теплообменных аппаратов.

В **четвертой главе** проводится численный расчет трубчато-ленточного теплообменного аппарата, описанного в третьей главе, с использованием для расчета среднего температурного напора метода Смита. Рассматривается алгоритмизация разработанного метода расчета значения величины среднего температурного напора по выражению (5), которое оптимально с точки зрения алгоритмизации.

$$\tau = \frac{(T_{11} - T_{21})}{\left[\frac{(T_{11} - T_{12})}{\tau}\right] \cdot \left[\frac{(T_{22} - T_{21})}{\tau}\right]} \cdot e^{-\frac{(T_{11} - T_{12})}{\tau}} \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^p \cdot \frac{\left[\frac{(T_{22} - T_{21})}{\tau}\right]^{m+p+1} \cdot \left[\frac{(T_{11} - T_{12})}{\tau}\right]^n}{n! p! m! (m + p + 1)} \quad (5)$$

В алгоритме реализован следующий ход расчета:

1. Задаются начальные и конечные температуры теплоносителей, число членов ряда, точность расчета и максимальное количество итераций.

2. По заданным температурам определяется начальная задаваемая величина, являющаяся точкой отсчета – среднелогарифмический или среднеарифметический температурный напор. (Среднеарифметический

температурный напор используется в случае, когда невозможно детерминировать величину среднелогарифмического температурного напора.)

3. Массив исходных данных передается в функцию расчета.
4. Полученная величина сравнивается с заданной в текущей итерации.
5. Если разница между заданным и полученным значением не превышает заданной величины точности расчета, расчет останавливается.

В блок-схеме использованы следующие обозначения:

1. $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ – Начальные и конечные температуры теплоносителей.
2. AMTD (Arithmetical Mean Temperature Difference) – Среднеарифметический температурный напор.
3. LMTD (Logarithmical Mean Temperature Difference) – Среднелогарифмический температурный напор.
4. MTD (Mean Temperature Difference) – Средний температурный напор.
5. CMTD (Corrected Mean Temperature Difference) – Средний температурный напор при перекрестном токе теплоносителей (Среднелогарифмический температурный напор с поправкой на перекрестный ток).
6. NaN (Not a Number) - Пустое множество.
7. eFault – Заданная точность.
8. N – Число членов ряда.
9. s – Текущее заданное значение.
10. fS – Текущее расчетное значение.

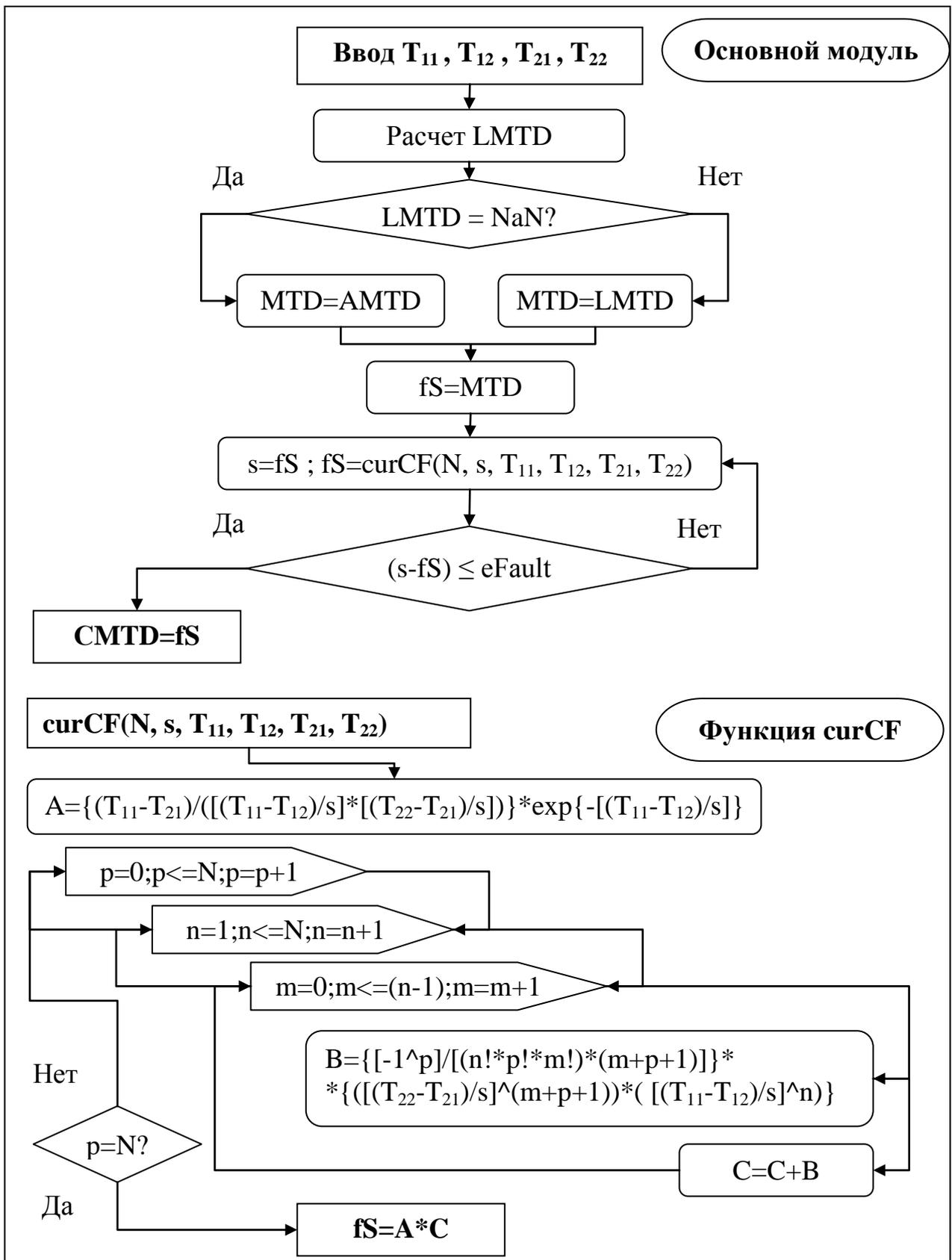


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета значения величины среднего температурного напора по разработанному методу.

Приводятся результаты расчета трубчато-ленточного теплообменного аппарата с применением разработанного алгоритма расчета среднего температурного напора. Результаты расчета с применением метода Смита и разработанного метода сопоставляются, верифицируются.

Проводится детальный анализ сопоставления вышеуказанных методов. Сопоставление производится посредством численного эксперимента - расчета значений величины среднего температурного напора для задаваемых температурных режимов.

Глава заканчивается общими выводами по верификации методов и численному анализу.

Выводы

1. Получено точное аналитическое решение, имеющее преимущество перед существующими решениями в точности определения значения величины среднего температурного напора за счет использования абсолютных величин, а не относительных.

2. Полученные решения реализованы в виде модульных алгоритмов и программ, верифицированы численным экспериментом с аналогичными методами, что позволило определить более высокую сходимость и устойчивость полученных в главе 2 решений.

3. Предложены исчерпывающие рекомендации по составу оснастки в качестве базы для алгоритмизации конструкторского теплогидравлического расчета, составлению отдельных алгоритмов и программ, ходу расчета и численному моделированию.

4. Разработаны алгоритмы и программы теплогидравлического расчета компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов, отвечающие современным требованиям к системам автоматизированного проектирования теплообменного оборудования;

5. Сгенерированы программы расчета значения величины среднего температурного напора при одноходовом перекрестном токе с неперемешивающимися средами по классическим и разработанному методам.

Публикации по теме диссертации

1. Флейтлих Б.Б., Лобанов И.Е., Низовитин А.А. Математическое моделирование предельного изотермического гидравлического сопротивления при турбулентном течении за счет турбулизации потока в шероховатых трубах малого диаметра // Вестник Московского авиационного института. - М.: Изд-во МАИ–ПРИНТ, 2010. - Т.17, №5 - С. 105-110.

2. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В., Лобанов И.Е. Расчет среднего температурного напора в одноходовом по обеим полостям перекрестноточном теплообменнике с неперемешивающимися средами методом Смита // Теплоэнергетика. – 2011. - №3. – С.74-77.

3. Флейтлих Б. Б., Лобанов И. Е. Предельные закономерности для среднеарифметического и среднеинтегрального (среднелогарифмического) температурных напоров для прямоточных и противоточных теплообменных аппаратов // Аспирант и соискатель. - 2010. - №5. - С. 75-79.

4. Флейтлих Б.Б., Лобанов И.Е. Современные методы расчёта среднего температурного напора в перекрёстно-точных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами // Сборник тезисов докладов 9-ой Международной конференции "Авиация и космонавтика - 2010". - СПб.: Мастерская печати, 2010. - С. 203-204.

5. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В. Расчет среднего температурного напора в одноходовом по обеим полостям перекрестноточном теплообменнике с неперемешивающимися средами методом Смита // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. - М.: Изд-во МЭИ, 2010. - С. 166-169.

6. Флейтлих Б.Б. Расчет среднего температурного напора в перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися

средами // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2010». Москва. Аннотации работ. – СПб.: Мастерская печати, 2010. - С. 46.

7. Флейтлих Б.Б., Лобанов И.Е. Средний температурный напор в перекрестно-точных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXV Академических чтений по космонавтике, Москва, январь 2011./ Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2011. – С. 200.

8. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В. CMTD-Smith – Программа расчета среднего температурного напора в одноходовых перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами по методу Смита // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов <Наука и образование>, № 1(8), 2010. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/1.doc>. (дата обращения: 18.10.2010)

9. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В. CMTD-Nusselt – Программа расчета среднего температурного напора в одноходовых перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами по методу Нуссельта // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов <Наука и образование>, № 1(8), 2010. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/1.doc>. (дата обращения: 18.10.2010)

10. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В. A2A-HTU – Программа расчета конструкции высокотемпературного воздухо-воздушного перекрестно-противоточного пластинчато-ребристого теплообменного аппарата // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов <Наука и образование>, № 1(8), 2010. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/1.doc>. (дата обращения: 18.10.2010)

11. Флейтлих Б.Б., Дубровский Е.В. G2A-HTU – Программа расчета конструкций высокотемпературных газо-воздушных перекрестно-противоточных пластинчато-ребристых рекуператоров для газотурбинных

двигателей // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов <Наука и образование>, № 1(8), 2010. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/1.doc>. (дата обращения: 18.10.2010)

12. CMTD-Smith – Программа расчета среднего температурного напора в одноходовых перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами по методу Смита: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15278 / Б.Б. Флейтлих, Е.В. Дубровский. № 50201000216 ; заявл. 27.01.2010; опубл. 24.02.2010.

13. CMTD-Nusselt – Программа расчета среднего температурного напора в одноходовых перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами по методу Нуссельта: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15279 / Б.Б. Флейтлих, Е.В. Дубровский. № 50201000217 ; заявл. 27.01.2010; опубл. 24.02.2010.

14. A2A-NTU – Программа расчета конструкции высокотемпературного воздухо-воздушного перекрестно-противоточного пластинчато-ребристого теплообменного аппарата: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15280 / Б.Б. Флейтлих, Е.В. Дубровский. № 50201000218 ; заявл. 27.01.2010; опубл. 24.02.2010.

15. G2A-NTU – Программа расчета конструкций высокотемпературных газо-воздушных перекрестно-противоточных пластинчато-ребристых рекуператоров для газотурбинных двигателей: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15281 / Б.Б. Флейтлих, Е.В. Дубровский. № 50201000219 ; заявл. 27.01.2010; опубл. 24.02.2010.