

М 88092

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ  
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и  
ордена трудового Красного Знамени государственный  
технический университет им. Н.Э.Баумана

---

На правах рукописи

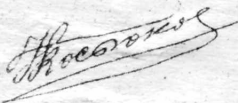
КОСТЮКОВ Николай Петрович

УДК 536.2:519.6

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИИ

05.13.18 – Теоретические основы математического  
моделирования, численные методы  
и комплексы программ

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 1993

Работа выполнена в Государственном Научно-исследовательском институте авиационных систем

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Петражицкий Г.Б.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,  
профессор Формалев В.Ф.

кандидат физико-математических  
наук Ермаков М.К.

Ведущая организация - Государственное машиностроительное  
конструкторское бюро "Вымпел"

Защита диссертации состоится 12 октября 1993 года  
в 12 час. 30 мин. на заседании Специализированного Совета  
Д.053.15.12 при МГТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005,  
Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией и  
Н.Э.Баумана.

Отзывы на автор  
печатью, просьба на  
Бауманская ул., д.5,  
Специализированного С

Автореферат разс

Ученый секретари  
Специализированн  
к.т.н., доцент

Заказ 394

Типогра

М88092



1088092

Костюков Н.П. Разработка

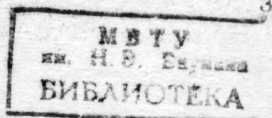
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопросы технологического обновления занимают важное место в разработке образцов новой техники, в том числе при проектировании, отработке и эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). Высокий уровень требований, предъявляемых к современным ЛА, может быть реализован, если на всех этапах разработки будут использованы новейшие технологические приемы.

Наблюдаемое повышение требований к энергомассовым характеристикам и функциональным возможностям современных ЛА и более жесткие условия их эксплуатации придают большую актуальность исследованию нестационарных многомерных тепловых процессов со сложной физической основой, активизируют решение ряда новых технических задач, связанных с динамикой температурного поля.

188092  
Блочно-иерархический подход к тепловому проектированию электро- радиоаппаратуры опирается на метод поэтапного моделирования, сущность которого составляет процесс разработки иерархической структуры тепловых моделей соответствующих элементов конструкции (электро- радиоэлементов, плат, кассет, блоков, отсеков) с последующим расчетом их теплового состояния с учетом внутренних тепловыделений от работающей аппаратуры и теплового воздействия окружающей среды на всех режимах эксплуатации. Разработка тепловых моделей такой структуры представляет собой идентификацию сложных составных систем с высокой степенью дискретизации достаточно простыми моделями с эффективными характеристиками и с низкой степенью дискретизации расчетной области. При этом необходимо решать задачи по определению нестационарных многомерных температурных полей в сложных составных телах с высокой степенью дискретизации расчетной области (платы, кассеты), а также требуется применять крупные расчетные сетки для моделирования теплового состояния совокупности нескольких отсеков, блоков.

Важнейшими составляющими этой задачи являются проблемы создания адекватных математических моделей и разработки высокоэффективных методов и средств, позволяющих проводить численное моделирование с требуемой точностью. В этой связи является актуальной разработка методов и средств решения задачи структурной и параметрической идентификации, и задачи получения надежных результатов вычислительного эксперимента по определению



тепловых нагрузок и температурных полей в составных конструкциях ЛА.

Цель работы состоит в комплексном решении задачи создания алгоритмов и комплексов программ для моделирования процессов теплообмена в элементах составных конструкций на основе разработки;

а) метода решения нелинейной многомерной задачи теплопроводности для составных областей на крупных сетках на базе конечно-разностного метода суммарной аппроксимации и метода уточнения экстраполяцией по Ричардсону;

б) метода идентификации тепловых моделей с использованием модифицированного комплексного метода Бокса и решений прямой задачи теплопроводности;

в) расчетно-экспериментального метода создания тепловых моделей при проектировании реальной конструкции ЛА.

Научная новизна. Составлена методика разработки программных средств для теплового проектирования составных конструкций ЛА. Разработаны алгоритм и комплекс программ для решения нелинейной задачи моделирования нестационарных двумерных и трехмерных температурных полей в элементах сложной составной конструкции.

Разработан алгоритм и программное обеспечение для уточнения численных решений нелинейных краевых задач теплопроводности методом экстраполяции по Ричардсону, проведены исследования решений краевой задачи, полученных на крупных неравномерных сетках для составных областей, изучены особенности этих решений, выработаны рекомендации по конструированию эффективных расчетных сеток для получения надежных численных решений.

Разработаны алгоритм и комплекс программ идентификации тепловых моделей на основе модифицированного комплексного метода Бокса, выработаны критерии останова вычислительного процесса.

Решены задачи по определению комплексов  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$  для моделей, содержащих одновременно до пяти материалов с неизвестными теплофизическими характеристиками, а также по определению комплексов  $\lambda_x(T)$ ,  $\lambda_y(T)$ ,  $C(T)$ ,  $q_v(\tau)$  для моделей, содержащих два материала с неизвестными теплофизическими характеристиками. При структурной идентификации тепловых моделей показана возможность использования модельных режимов и подобластей.

Проведено экспериментальное исследование процессов тепло-

обмена в конструкции аппаратурного блока, разработаны расчетные теплофизические схемы моделей основных узлов конструкции, определены эффективные теплофизические характеристики сложных составных узлов. Составлена расчетно-экспериментальная методика разработки тепловых моделей при проектировании реальной конструкции для различных режимов эксплуатации и стендовых испытаний.

Достоверность результатов обусловлена применением корректных математических моделей и методов и подтверждается проведенными вычислительными экспериментами, сравнениями с аналитическими решениями, с результатами решений, полученными другими авторами, с материалами стендовых и натурных экспериментов.

Практическая ценность работы состоит в разработанных методиках и комплексах программ для исследования процессов теплообмена в составных конструкциях и для идентификации тепловых моделей составных конструкций, а также в рекомендациях по использованию крупных расчетных сеток и в методиках по проведению идентификации тепловых моделей. Разработанные методики и программные комплексы вошли в АНИТУ - систему теплового проектирования конструкций и используются в практической работе ряда предприятий (ЦАГИ, Коломенский машиностроительный завод, Машиностроительное конструкторское бюро "Факел", ГосНИИАС и др.).

Апробация работы публикации. Основные результаты работы докладывались на конференциях ГосНИИАС (Москва, 1985, 1987 и 1989 гг.), ЦИАМ им. П.И.Баранова (Москва, 1989 г.), на Всесоюзных Гагаринских научных чтениях по космонавтике и авиации (Москва, 1985, 1986, 1988, 1990 гг.), на Всесоюзных выставках программных комплексов по численному решению задач термомеханики в МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1989, 1990 г.), на заседании подсекции "Теплообмен в электронном оборудовании" секции "Теплообмен" Научного Совета АН СССР по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" (Одесса, 1991). Основное содержание работы изложено в 16 печатных работах, а также использовано при составлении 22 научно-технических отчетов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 142 наименований, Общий объем работы 234 страницы, включая 94 рисунка и 31 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены вопросы совершенствования технологии теплового проектирования аппаратурных отсеков ЛА. Проведенный обзор литературы и анализ особенностей функционирования аппаратуры, с учетом возрастающих требований к разрабатываемым образцам новой техники, позволили определить круг наиболее актуальных задач, показана необходимость системного подхода к их решению. На основе проведенного анализа сформулированы задачи по совершенствованию и разработке методов и программных средств для теплового проектирования, решение которых и составило цели настоящей работы. Рассмотрены вопросы, связанные с выбором: физических и математических моделей; методов решения краевой и экстремальной задач, а также вопросы, связанные с особенностями программной реализации разрабатываемых алгоритмов. Также во введении приведена краткая характеристика работы, отмечена практическая ее направленность.

В первой главе рассмотрены особенности теплового проектирования аппаратурных отсеков ЛА, условия их эксплуатации, дан обзор литературных источников и сделан выбор методов математического моделирования.

Проведен анализ методов моделирования, рассмотрены особенности разработки моделей различных видов. Особое внимание уделено проблемам идентификации тепловых моделей, составляющих основу иерархического метода поэтапного моделирования сложных составных конструкций.

Проведенный обзор литературных источников показал важную роль системного подхода в разработке методик и программных средств теплового проектирования.

Рассмотрены основные принципы разработки алгоритмов и программ теплового проектирования. Составлена методика для разработки комплексов программ моделирования процессов теплообмена в конструкциях ЛА и для идентификации тепловых моделей. Особенностью этой методики является комплексная проработка проблемных вопросов с учетом сформулированных критериев на всех этапах создания комплекса программ с широким использованием вычислительного эксперимента. Показано методологическое и структурное совпадение процесса разработки программных средств и процесса проектирования конструкции ЛА.

Во второй главе приведены материалы, связанные с разра-

боткой методики и комплекса программ для исследования процессов теплообмена в сложных составных конструкциях ЛА. Физическая постановка задачи состоит в определении нестационарных двумерных или трехмерных температурных полей в элементах составных конструкций с учетом внутренних тепловыделений от работающей аппаратуры и зависимости теплофизических характеристик материалов от температуры для широкого спектра режимов эксплуатации ЛА.

Математически температурное поле составной конструкции моделируется с помощью дифференциального уравнения теплопроводности относительно температуры  $T(M, \tau)$ , как функции пространственных координат точки  $M$  и времени  $\tau$  имеет вид:

$$C_1 \frac{\partial}{\partial \tau} (T(M, \tau)) = \operatorname{div}(\bar{\lambda}_1 \operatorname{grad} T(M, \tau)) + q_{v_1}, \quad M \in V_1, \quad V_1 \in G; \quad (1)$$

где  $l=1, 2, \dots, L$  - количество однородных подобластей  $V_1$ ,  $C_1 = f_o(T)$  - объемная теплоемкость;  $\bar{\lambda}_1$  - тензор теплопроводности, компоненты которого зависят от температуры;  $q_{v_1} = f_q(M, \tau)$  - внутренние источники тепла;  $G$  - рассматриваемый объем тела.

Начальные условия:

$$T(M, \tau)|_{\tau=0} = f_o(x, y, z), \quad M \in G, \quad (2)$$

где функция  $f_o(x, y, z)$  предполагается известной. Объем  $G$  имеет внешние границы  $\Gamma_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ .

Для каждой точки  $P$ , принадлежащей соответствующей внешней границе  $\Gamma_i$  задаются граничные условия:

$$\lambda(P) \frac{\partial T(P, \tau)}{\partial n(P)} = \alpha_e(P, \tau) (T_r(P, \tau) - T(P, \tau)) - \varepsilon(P) \sigma_o (T^4(P, \tau) - T_{oo}^4(P, \tau)), \quad P \in \Gamma_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (3)$$

где  $\alpha_e$  - коэффициент теплоотдачи к поверхности  $\Gamma_i$  (находится по известным методикам);  $T_r$  - адиабатическая температура (находится по известным методикам);  $T_{oo}$  - температура окружающей среды, с которой поверхность обменивается лучистым потоком;  $\varepsilon$  - приведенная степень черноты системы (поверхность - окружающая среда);  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) - постоянная Стефана-Больцмана.

На границах контакта разнородных материалов ( $D$ ), входящих в  $G$ , должны выполняться условия идеального контакта:

$$T_1(M, \tau) = T_2(M, \tau), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(M, \tau)}{\partial n(M)} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(M, \tau)}{\partial n(M)}, \quad M \in D. \quad (4)$$

В случае неидеального контакта, его зона заменяется тонкой однородной прослойкой (на границах которой условия идеального контакта) из материала с эффективными теплофизическими характеристиками, которая с достаточной точностью должна моделировать термическое сопротивление зоны контакта. Задача (1)-(4) рассмотрена и решена для декартовой и цилиндрической систем координат.

В целях обеспечения решения основных задач теплового проектирования приведенная математическая модель дополнена моделями других процессов, протекающих в элементах конструкции. Для этого разработаны модели по учету: сложного теплообмена в воздушных прослойках, фазовых переходов в материалах, неидеального контакта, а также модели для расчета тепловых нагрузок на элементы конструкции с учетом усиления теплообмена в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем вблизи выступающих элементов.

На основании большого количества материалов вычислительных экспериментов по сравнению различных методов решения краевой задачи на крупных сетках и с учетом критериев разработки комплекса программ в качестве базового используется метод конечных разностей с применением метода двуциклического покомпонентного расщепления на основе локально-одномерной схемы, а для решения систем алгебраических уравнений - метод прогонки. Использование этого подхода в совокупности с методом уточнения численных решений экстраполяцией по Ричардсону позволило получать надежные решения нелинейной краевой задачи теплопроводности на достаточно крупных пространственно-временных сетках.

В соответствии с методикой разработки программных средств был создан комплекс программ моделирования процессов теплообмена (КП МПТ). КП МПТ состоит из четырех программных комплексов (решения нестационарных двухмерных и одномерных задач теплопроводности; решения нестационарных трехмерных задач теплопроводности; расчета тепловых нагрузок, действующих на ЛА при его эксплуатации; расчета тепловых нагрузок в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем около выступающих элементов) и пакета обслуживающих подпрограмм (обработки результатов стендовых экспериментов; статистической обработки; интерполирования таблиц и др.).

Все модули КП МПТ оформлены в виде подпрограмм на машинно-

независимом подмножестве языка FORTRAN. КП МПТ может эксплуатироваться на ЭВМ типа ЕС, IBM, VAX, а также на ПЭВМ типа PC AT, PS/2 с процессорами 286/287 и выше, с оперативной памятью более 500 К.

Сравнения с аналитическими решениями проводились в диапазонах чисел Фурье  $0,00004 < Fo \leq 40,0$  и чисел Био  $0 < Bi \leq 6,0$ . Анализ этих решений показывает, что расхождения в неуточненных решениях на крупных сетках не превышают  $0,02$  ( $Fo > 0,04$ ) и  $0,03$  ( $0,0001 \leq Fo \leq 0,04$ ); расхождения уточненных решений не превышают  $0,004$  ( $0,0001 \leq Fo \leq 0,04$ ) и  $0,0002$  ( $Fo > 0,04$ ).

Проведенные сравнения с решениями, полученными по программам других авторов АНТЛ10, ЦИЛОДН, БАЛАНС, АНТК15, АН181, АНТД1 показали совпадения в 3 и более значащих цифрах результатов при значительно меньших затратах процессорного времени. Расхождения с результатами натурных и стендовых экспериментов не превышали погрешностей измерений.

В третьей главе приведены материалы по повышению эффективности математического моделирования. Как показали обзор литературы и проведенные исследования, одним из методов, на базе которого возможна реализация алгоритмов, позволяющих получать надежные, высокоэффективные решения с контролируемой погрешностью, является метод уточнения численных решений экстраполяцией по Ричардсону.

Уточненное решение нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности находится из зависимости

$$T^y = \sum_{i=1}^n \gamma_i^n T \frac{\Delta\tau/i^2}{\Delta x/i, \Delta y/i, \Delta z/i} \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, n$ ;

$T \frac{\Delta\tau/i^2}{\Delta x/i, \Delta y/i, \Delta z/i}$  - приближенное решение на сетке  $(\Delta\tau/i^2, \Delta x/i, \Delta y/i, \Delta z/i)$ ;

$\gamma_i^n$  - весовые коэффициенты.

Анализ материалов вычислительных экспериментов, проведенных автором для реальных физических моделей, показал, что для получения погрешности вычислений, не превышающей погрешности входных данных и имеющей приемлемую погрешность вычислительного эксперимента в целом, достаточно выбрать для решения рассматриваемого класса задач  $n=2$  ( $\gamma_1^2 = -1/3$ ,  $\gamma_2^2 = 4/3$ ).

Для исследования свойств решений, получаемых с помощью ме-

тогда уточнения экстраполяцией по Ричардсону на крупных сетках, были спланированы и осуществлены ряд вычислительных экспериментов для достаточно сложных составных областей. Коэффициенты температуропроводности подобластей находились в диапазоне  $0,0625 \cdot 10^{-6} \leq a \leq 64,0 \cdot 10^{-6}$ . Подобласти были расположены так, чтобы был обеспечен широкий спектр сочетаний теплофизических характеристик на границах подобластей.

Исследования были проведены на сетках с параметрами  $0,0000625 \leq \Delta x \leq 0,016$ ,  $0,0000625 \leq \Delta y \leq 0,016$ ,  $0,0625 \leq \Delta t \leq 64,0$ , что позволило изучить свойства уточненных решений.

Найдено соотношение расчетных шагов исходной сетки  $\Delta t / \Delta x^2 = \Delta t / \Delta y^2 = \Delta t / \Delta z^2 = 10^6$ , при котором эффективность уточнения максимальна на крупных сетках.

Проведенные вычислительные эксперименты показали высокую эффективность метода уточнения при решении нелинейных задач, причем достигнутая при этом точность позволяет не только обходиться без специальных методов решения нелинейных задач (методы с использованием итераций), но возможно существенное (в 8 и более раз в зависимости от конкретной задачи) снижение затрат процессорного времени для получения решений с заданной точностью.

В четвертой главе приведены материалы, связанные с постановкой и решением задачи идентификации, а также материалы разработки комплекса программ идентификации тепловых моделей (КПИТМ).

Физическая сущность поставленной задачи заключается в идентификации сложной неоднородной системы с высокой степенью дискретизации (неоднородные подобласти, состоящие из элементов  $V_{11,1}^0$  со свойствами  $N_{12}^0(V_{11})$ , входящие в  $A_1^0$  области  $G^0$  (реальный объект) см. рис. 1) однородной системой или системой с существенно меньшей неоднородностью (однородные подобласти  $A_1$  со свойствами  $F_1(A_1)$  см. рис. 2) и низкой степенью дискретизации при совпадающих свойствах подобластей  $B^0$  и  $B$  (по критерию расхождения между температурами в этих подобластях в соответствующих точках). В нашем случае, при идентификации теплофизических моделей свойствам  $N_{12}^0(V_{11})$  и  $F_1(A_1)$  соответствуют комплексы теплофизических характеристик  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, c, q_v$ .

В разделе приведены постановки задач структурной и параметрической идентификации, решение которых сводится к задаче в экстремальной постановке, где требуется найти вектор  $\tilde{u}^*$ , обе-

спечаивающий минимум функционала  $\Phi(\tilde{u})$ :

$$\Phi(\tilde{u}^*) = \min_{\tilde{u} \in \tilde{U}} \Phi(\tilde{u}), \quad (6)$$

$$\Phi(\tilde{u}) \approx \sum_{n=1}^{N_T} \int_0^{\tau} (\varphi_n^2(\tilde{u}, \tau) / \delta^2) \gamma_n(\tau) / \gamma_{\Sigma} d\tau \quad (7)$$

$$\varphi_n^2(\tilde{u}, \tau) = ((T_n^O(\tau) - T_n(\tilde{u}, \tau)) / T_n^O(\tau))^2, \quad (8)$$

$$\gamma_{\Sigma} \approx \sum_{n=1}^{N_T} \int_0^{\tau} \gamma_n(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$\tilde{u}_i = (u_i - a_i) / (b_i - a_i), \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

с ограничениями

$$0 \leq \tilde{u}_i \leq 1, \quad (11)$$

$$Q_1(\tilde{u}_k) = 0, \quad l=1, 2, \dots, L, \quad k \in [1, N]_1, \quad L < N \quad (12)$$

и оценкой значения функционала  $\Phi(\tilde{u})$  в точке  $\tilde{u}^*$

$$\Phi(\tilde{u}^*) \approx 1, \quad (\text{при условии } N \leq N_T N_{\tau}), \quad (13)$$

где  $\delta$  - среднеинтегральная оценка коэффициента вариации суммарной погрешности задачи идентификации для соответствующих точек в областях  $B$  и  $B^O$ ,  $\gamma_n(\tau)$  - весовые коэффициенты соответствующих точек, включающие в себя функциональные зависимости погрешностей решаемой задачи,  $a_i$  - нижние,  $b_i$  - верхние ограничения,  $N_{\tau}$  - количество измерений по времени,  $N_T$  - количество точек по пространству.

Алгоритм решения задачи идентификации основан на методе поиска минимума функционала  $\Phi(\tilde{u})$  при ограничениях - модифицированном комплексном методе Бокса. Для повышения эффективности алгоритма в него введены процедуры, увеличивающие вероятность нахождения глобального минимума, а также процедуры, формирующие условия окончания процесса поиска экстремального значения. Проведенная нормировка параметров экстремальной задачи позволяет решать ее при минимальном влиянии вычислительных погрешностей, связанных с разрядностью ЭВМ.

Сравнения с аналитическими решениями экстремальной задачи были проведены для функций: Розенброка, Пауэлла и др. Для функции Розенброка были проведены сравнения решений, получаемых модифицированным комплексным методом Бокса, с решениями, получаемыми с помощью методов Нелдера-Мида и Флетчера-Ривса. Как показали сравнения, используемый метод решения экстремальной

задачи оказался эффективнее по числу обращений к вычислению функции и имеет более высокую точность получаемых результатов.

Верификация методики и разработанного КП ИТМ была проведена на решениях ряда обратных коэффициентных одно, двух и трехмерных нестационарных нелинейных задач теплообмена и на сравнениях с решениями, полученными другими авторами. Методика исследований была следующей. Решалась соответствующая прямая задача для области  $G^0$ . Задача идентификации состояла в нахождении комплексов  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ ,  $C$  и  $q_v$  для подобластей  $A_1$  по значениями температур в подобластях  $B_1^0$ .

Были исследованы решения: для различных значений параметров граничных условий; для различных мест расположения точек в области  $B^0$  и количества этих точек; для различных интервалов идентификации по времени; для ряда начальных значений датчика случайных чисел; для нескольких уровней погрешности в задании температурного поля для подобласти  $B^0$ .

Уровень погрешности для незашумленных решений в подобласти  $B^0$  составил  $\delta U < 0,3\%$  (максимальный для комплекса  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$ ) при уровне погрешности восстановленного температурного поля в подобласти  $B$   $\delta T \approx 0,001\%$ . Отмечена устойчивая и эффективная работа алгоритма при зашумленных исходных данных - при округлении значений температур для подобласти  $B^0$  до двух значащих цифр погрешность определения комплекса  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$  составила  $\delta U \approx 22\%$ .

Проведено исследование решений задач по одновременному определению комплексов  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$  для нескольких подобластей  $A_1$ . Для  $i = 4$  (размерность искомого вектора  $\bar{U}$  равна 16) получено при  $\delta T \approx 0,001\%$ ,  $\delta U \approx 0,12\%$ . Для  $i = 5$  (размерность вектора  $\bar{U}$  равна 20) при  $\delta T \approx 0,001\%$ ,  $\delta U \approx 0,3\%$ .

Была решена задача по нахождению  $\lambda_x(T)$ ,  $\lambda_y(T)$ ,  $C(T)$ ,  $q_v(\tau)$  одновременно для двух подобластей  $A_1$  (размерность вектора  $\bar{U}$  равна  $2 \cdot 4 \cdot 4 = 32$ , кусочно-линейные зависимости от  $T$  и  $\tau$  восстанавливались по четырем точкам). Погрешность нахождения элементов вектора  $\bar{U}$  составила  $\delta \bar{U} \approx 6,8\%$  при погрешности восстановления температурного поля в подобластях  $B_1$   $\delta T \approx 0,014\%$ .

Работоспособность разработанного КП ИТМ была проверена на решениях задач идентификации при определении эффективных теплофизических характеристик сложных составных систем. В работе приведены решения двух таких задач. При решении первой методи-

ческой задачи была отработана методика определения эффективных теплофизических характеристик сложных составных систем. Одновременно определялись комплексы эффективных теплофизических характеристик ( $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $c$ ,  $q_v$ ) для четырех подобластей, включающих композитные материалы. Каждый композитный материал представлял собой равномерно распределенную систему двух материалов с упорядоченными (у) и неупорядоченными (н) структурами. Погрешности восстановления температурного поля при идентификации составили  $\delta T^Y \approx 0.11\%$  и  $\delta T^H \approx 0.18\%$ , погрешности в определении  $c$  и  $q_v$  составили  $\delta U_{c,q}^Y \approx 2.9\%$  и  $\delta U_{c,q}^H \approx 12\%$ . При замене подобластей  $B^0$ ,  $B$  и режима нагревания близкими к реальным  $\delta T^Y \approx 1.0\%$ ,  $\delta T^H \approx 1.22\%$ . Использование этой методики позволяет существенно упрощать расчетные охемы таких систем. Вторая задача идентификации представляла собой пример использования разработанных методов и программ при решении реальных задач по исследованию процессов теплообмена в конструкциях аппаратурных блоков при их проектировании.

Находились эффективные значения  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  для конструкции реального аппаратурного блока (5 многослойных двухсторонних плат, расположенных в корпусе вертикально). Для модельного режима идентификации и модельных подобластей  $B^0$  и  $B$   $\delta T = 1.17\%$ ,  $\lambda_x = 0.29$  Вт/м\*К,  $\lambda_y = 0.12$  Вт/м\*К. Для условий реальной конструкции отсека при реальном режиме 1 погрешности температурных полей при замене сложной области областью с эффективными характеристиками составили  $\delta T^1 = 1.32\%$ , при режиме 2  $\delta T^2 = 1.44\%$ . Показано, что решение задачи идентификации для всех четырех аппаратурных блоков, входящих в проектируемый отсек, дает выигрыш в размерности по пространству более чем в 200 раз.

В пятой главе приведены материалы по экспериментальному исследованию теплового состояния элементов конструкции ЛА.

Системы газодинамического стенда обеспечивали обтекание объекта исследования дозвуковым высокоскоростным потоком горячего газа, моделируя в заданных точках объекта испытаний соответствующий температурный режим.

Объект испытаний представляет собой натурный отсек ЛА (см. рис.3) с расположенными внутри него теплофизическими макетами четырех аппаратурных блоков. Для регистрации температурных полей в элементах конструкции объекта испытаний было установлено 96 термопар типа ХХ.

В процессе обработки результатов эксперимента были сделаны оценки и произведен учет инструментальных, методических, систематических погрешностей измерений температуры и давления. Для этого были разработаны соответствующие методики и программы расчета погрешностей измерений на ЭВМ.

По результатам экспериментальных исследований были разработаны расчетные теплофизические модели блоков, составляющих отсек, для чего были решены три задачи идентификации.

Первая задача состояла в нахождении эффективных теплофизических характеристик  $\lambda$  и  $C$  одновременно для четырех составных подобластей (модель А1). Две подобласти моделировали аппаратурные блоки, третья подобласть моделировала составную зону места стыка конструкций отсека и блока аппаратуры, четвертая подобласть моделировала теплозащитный материал (типа АТМ-5, толщиной 10 мм) с известными значениями  $\lambda$  и  $C$  для того, чтобы можно было проконтролировать правильность решения задачи идентификации. Как показали результаты сравнения, погрешность определения  $\lambda$  составила 14,5%, а погрешность определения  $C$  - 23,8% при достигнутой погрешности восстановления температурного поля равной 0,7%. Эти результаты можно считать удовлетворительными, так как материал перед установкой в отсек обклеивался стеклотканью и приклеивался к обшивке, что привело к увеличению его эффективной теплопроводности и объемной теплоемкости.

Вторая задача идентификации заключалась в определении зависимости эффективной теплопроводности зоны контакта (модель А2) в месте соприкосновения поддерживающего шпангоута с аппаратурным блоком от перепада температуры этих элементов вследствие их термического расширения (сжатия). Кусочно-линейная зависимость  $\lambda(\Delta T)$  была найдена при максимальной погрешности в восстановлении температурного поля равной 0,85%.

Третья задача идентификации (А3) заключалась в нахождении комплексов теплофизических характеристик  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$  одновременно для двух аппаратурных блоков и для имитатора третьего блока, выполненного из материала с известными теплофизическими характеристиками (текстолит), причем мощности внутренних тепловыделений первых двух блоков были также известны. При максимальной погрешности восстановления температурного поля в элементах конструкции равной 0,84% погрешности в определении  $\lambda$  и  $C$  текстолита составили 6,9% и 5,5% соответственно, а погрешности в

определении  $q_v$  для аппаратурных блоков составили 7,2% и 8,6%.

Для разработанных теплофизических моделей объекта испытаний с учетом найденных теплофизических характеристик были проведены расчеты температурных полей по двум режимам, реализованным в процессе испытаний (из них первая половина первого режима была использована при решении задач идентификации). Проведено сравнение температурных зависимостей, полученных расчетным и экспериментальным методами. Получено хорошее согласование расчетных и измеренных значений температур (см. рис. 4...6). Максимальная погрешность составила 1,2% и не превышает оценки уровня погрешности измерений.

Составленные в результате проведенной работы расчетные схемы элементов конструкции были использованы при дальнейшем проектировании ЛА.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. В рамках системного подхода к тепловому проектированию конструкций летательных аппаратов на базе иерархического метода поэтапного моделирования поставлена и реализована в виде комплекса программ нелинейная задача моделирования нестационарных двухмерных и трехмерных температурных полей в элементах сложной, составной конструкции ЛА с учетом внутренних тепловыделений для широкого спектра режимов эксплуатации;

2. Разработан метод для уточнения численных решений нелинейных краевых задач теплопроводности методом экстраполяции по Ричардсону на основе метода покомпонентного расщепления с использованием локально-одномерной схемы. С помощью вычислительного эксперимента проведены исследования решений краевой задачи, полученных на крупных неравномерных сетках с помощью метода экстраполяции. Изучены особенности этих решений, выработаны рекомендации по конструированию эффективных расчетных сеток для получения надежных численных решений. Показано, что использование уточнения решений и рекомендаций по конструированию расчетных сеток снижает затраты процессорного времени в 8 и более раз при решении задачи с той же погрешностью.

3. Разработан метод идентификации тепловых моделей на основе модифицированного комплексного метода Бокса, выработаны критерии останова вычислительного процесса. Решены задачи по определению комплексов  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$  для моделей, содержащих

одновременно до пяти материалов с неизвестными теплофизическими характеристиками, а также по определению комплексов  $\lambda_x(T)$ ,  $\lambda_y(T)$ ,  $C(T)$ ,  $q_v(t)$  для моделей, содержащих два материала с неизвестными теплофизическими характеристиками. Исследованы эффективные теплофизические характеристики ( $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $C$ ,  $q_v$ ) моделей, содержащих четыре подобласти с различной степенью неоднородности. На примере конкретного аппаратного блока исследована возможность и разработана методика замены модели реального блока большой размерности моделью меньшей размерности с найденными эффективными характеристиками для различных режимов эксплуатации. При структурной идентификации тепловых моделей показана возможность использования модельных режимов и модельных подобластей В и В<sup>0</sup>.

4. Составлена методика разработки комплексов программ для теплового проектирования элементов конструкции ЛА. С использованием разработанной технологии созданы комплекс программ моделирования процессов теплообмена в конструкции ЛА и комплекс программ идентификации тепловых моделей, проведена их верификация на сравнениях с аналитическими решениями и с решениями, полученными по другим программам, на решениях модельных и реальных задач, на сравнениях с результатами стендовых и натурных экспериментальных исследований. Показана высокая точность получаемых решений и эффективность разработанных комплексов программ.

5. Проведено экспериментальное исследование процессов теплообмена в конструкции аппаратного блока, разработаны расчетные теплофизические схемы моделей основных узлов конструкции, определены эффективные теплофизические характеристики сложных составных узлов. Показано хорошее согласование температурных зависимостей реально измеренных и рассчитанных с помощью разработанных программных комплексов. Составлена расчетно-экспериментальная методика разработки тепловых моделей при проектировании реальной конструкции для различных режимов эксплуатации и стендовых испытаний.

6. Разработанные методы, алгоритмы и комплексы программ включены в АНИТУ - систему теплового проектирования ЛА и внедрены в практику работы научных и производственных предприятий (ГосНИИАС, ЦАГИ, КМЗ, МКБ "Факел" и др.).

Основные результаты по теме диссертации отражены в следующих опубликованных работах:

1. Костюков Н.П., Сафонов В.Е., Петражицкий Г.Б. Особенности получения эффективных численных решений дифференциального уравнения теплопроводности на нерегулярной сетке // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, 1985. - М.: Наука, 1986. - С. 139.

2. Дзюба А.К., Костюков Н.П. Оценка эффективности численных решений задач теплового проектирования ЛА, полученных методами конечных разностей и конечных элементов // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, 1988. - М.: Наука, 1989. - С. 137.

3. Костюков Н.П. Уточнение численных решений дифференциального уравнения теплопроводности методом экстраполяции по Рундсону // Проектирование теплонагруженных конструкций ЛА / Под ред. Б.М.Панкратова. - М.: Изд-во МАИ, 1989. - С. 36-41.

4. Дзюба А.К., Костюков Н.П. Программный комплекс АНОД20 для оптимизации элементов конструкции отсеков в тепловом проектировании ЛА // Всесоюзная выставка программных комплексов по численному решению задач термомеханики. - М.: Изд-во МГТУ, 1990. - С. 21.

5. Дзюба А.К., Костюков Н.П., Сафонов В.Е. Программный комплекс АНКД20 для моделирования нестационарных двумерных температурных полей // Всесоюзная выставка программных комплексов по численному решению задач термомеханики. - М.: Изд-во МГТУ, 1990. - С. 23.

6. Дзюба А.К., Костюков Н.П., Сафонов В.Е. Программный комплекс АНКД30 для моделирования нестационарных трехмерных температурных полей // Всесоюзная выставка программных комплексов по численному решению задач термомеханики. - М.: Изд-во МГТУ, 1990. - С. 22.

7. Система алгоритмов и программы АНИТА для теплового проектирования ЛА / В.Е.Сафонов, А.К.Дзюба, Н.П.Костюков и др. // Тепловое проектирование систем / Под ред. Б.М.Панкратова. - М.: Изд-во МАИ, 1990. - С. 269-272.

8. Костюков Н.П., Дзюба А.К. Сравнительный анализ численных решений нелинейной задачи теплопроводности на крупных сетках // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1990, 1991 г.г. - М.: Наука, 1991. С. 107-108.

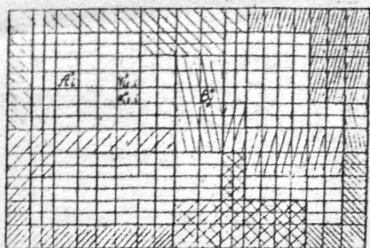


Рис.1. Общий вид исходной модели (область G)

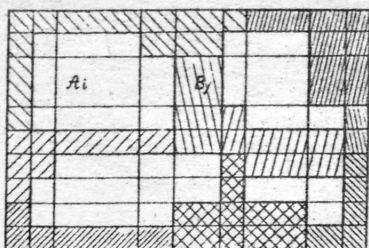


Рис.2. Общий вид идентифицирующей модели (область G)

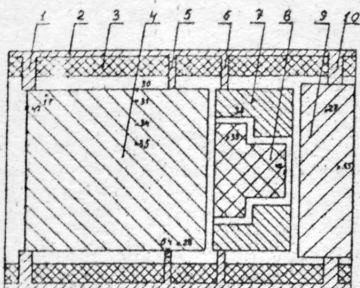


Рис.3. Схема исследуемого отсека: 1,6,10-шпангоуты, 2-обшивка, 3-теплоизоляция, 4-пассивный блок, 5-поддерживающий шпангоут, 7,8,9- аппаратурные блоки, (\*)-точки измерений температуры

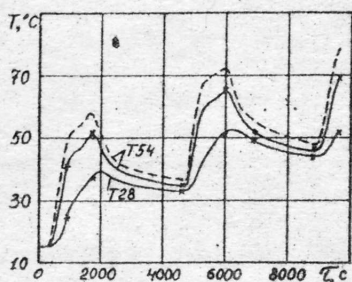


Рис.4. Влияние зависимости теплопроводности места контакта от перепада температуры (режим № 2, модель A2: (—) — с учетом  $\lambda(\Delta T)$ , (---) — без учета  $\lambda(\Delta T)$ , (\*) — экспериментальные значения)

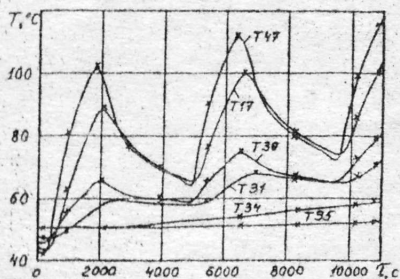


Рис.5. Сравнение рассчитанных (—) и измеренных (\*) температур для модели A1 (режим №1)

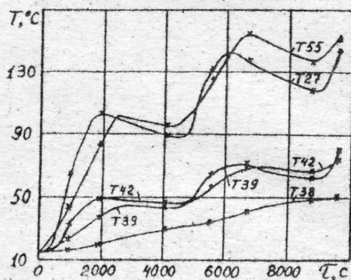


Рис.6. Сравнение рассчитанных (—) и измеренных (\*) температур для модели A3 (режим №2)