

На правах рукописи

Копылов Дмитрий Владимирович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков – 1993

ЛБ 27.470

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов
Харьковского политехнического института

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00814336 (P)

Научные руководители - доктор технических наук,
профессор Гринев В.Б.
- кандидат технических наук,
доцент Гарев О.Л.

Официальные оппоненты - член-корреспондент АН Украины,
доктор технических наук,
Мацевитый Ю.М.
- кандидат технических наук,
доцент Бутенко В.Ю.

Ведущая организация - КБ "Южное", г. Днепропетровск

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1993 г.
в _____ час. на заседании специализированного совета
Д 068.39.06 при Харьковском политехническом институте
(310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан " ____ " _____ 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета

Бортовой В.В.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время сформировалась устойчивая тенденция смещения центра тяжести прикладных вычислений в сторону персональных ЭВМ. Программные и аппаратные ресурсы ПЭВМ создают качественно новые возможности для создателей конструкций, по которым не накоплен достаточный опыт разработки и эксплуатации. Цикл разработки таких конструкций предполагает учет самых разнообразных факторов, проведение большого числа экспериментов, как численных, так и натурных, предъявляет повышенные требования к достоверности исследований. Время необходимое для выполнения полного цикла проектирования можно сократить, последовательно реализуя иерархический подход в моделировании и методах расчета. Проектировщик получает возможность ставить и решать задачи анализа и оптимизации в терминах предмета своего исследования для моделей первого приближения. Расчет нескольких выбранных вариантов конструкции и проверка эффекта оптимизации проводится на моделях с более высокой степенью детализации с дальнейшим экспериментальным подтверждением, если это возможно.

Настоящая работа посвящена решению задач, связанных с проектированием конструктивных элементов, эксплуатирующихся в условиях интенсивного нагрева, — узлов электровакуумных СВЧ приборов и несущих тонкостенных стержней космических крупногабаритных конструкций. Общими свойствами математических моделей этих достаточно различных объектов исследования являются определяющий вклад радиационной составляющей в процесс теплообмена и жесткие требования к сохранению геометрической формы в нагретом состоянии при обеспечении прочности. Особое внимание уделено вопросу идентификации математических моделей и реальных конструкций по имеющимся количественным и качественным экспериментальным данным.

В своей работе автор опирается на методы решения термоупругих задач, расчета тонкостенных конструкций и оптимизации, большой вклад в развитие которых внесли Валицвили Н.В., Григолюк Э.И., Гринев В.Б., Коваленко А.Д., Коляно Ю.М., Лурье А.И., Мацевитый Ю.М., Подгорный А.Н., Подстригач Я.С., Пшеничный Б.Н., Федоренко Р.П., Филиппов А.П. и др.

Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ, проводимых в Харьковском политехническом институте.

Целью работы является применение современной методологии вычислительного эксперимента для решения задач проектирования конструктивных элементов, функционирующих в условиях неравномерного нагрева вызванного лучистым теплообменом в вакууме. Этот подход предполагает:

- построение эффективных математических моделей для расчета температурных полей в тонкостенных конструкциях при определяющем влиянии радиационной составляющей теплообмена;
 - исследование напряженно-деформированного состояния этих элементов, вызванного неравномерным нагревом;
 - подбор численных методов и алгоритмов, соответствующих математическим моделям различного уровня и ориентированных на проведение большого количества вариантных расчетов при изменении параметров исследуемых объектов в широком диапазоне;
 - анализ влияния геометрических и физических параметров конструкций на температурное поле, напряжения и деформации в них, а также поиск рациональных конструктивных решений.
- Ставится задача выработки практических рекомендаций по проектированию элементов катодно-сеточных узлов СВЧ приборов и крупногабаритных космических конструкций.

Научная новизна. Разработана иерархическая система математических моделей для решения стационарной задачи теплообмена с учетом излучения и задачи термоупругости в тонкостенных элементах конструкций изделий электронной техники. На базе этих моделей ставится и решается ряд задач рационального и оптимального проектирования узлов электровакуумных приборов. Выработаны практические рекомендации по проектированию элементов катодно-сеточных узлов СВЧ приборов. Предложен алгоритм решения нелинейной задачи стационарного теплообмена с учетом излучения в замкнутом тонкостенном профиле произвольной формы. На его основе впервые проведен численный анализ влияния пространственной ориентации тонкостенного стержня относительно источника теплового излучения на его температурное поле и тепловые деформации. Получены практические результаты по температурному деформированию стержневых элементов крупногабаритных космических конструкций.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается: тщательным обоснованием принимаемых допущений при построении математических моделей; непротиворечивостью этих допущений и полученных результатов; последовательной идентификацией модели и реального объекта исследования; построением моделей низшего уровня на основании решений, полученных для моделей с более высоким уровнем детализации объекта; хорошим согласованием результатов численных решений с данными, полученными из специально проведенного эксперимента; качественным совпадением результатов численного анализа модели и поведения реальных объектов; проверкой достижения эффектов оптимизации, а также строгостью математических выкладок и доказательств и использованием апробированных численных методов.

Практическая ценность работы заключается в разработке и обосновании иерархической системы моделей для решения задачи стационарного теплообмена с учетом теплообмена излучением и задачи термоупругости в различных тонкостенных конструктивных элементах, к которым могут быть отнесены несущие стержни крупногабаритных космических конструкций, узлы электровакуумных СВЧ приборов и другие элементы, сходные с ними по условиям эксплуатации. Сформирован комплекс алгоритмов численного решения задач теплообмена и термоупругости для предложенных математических моделей различного уровня детализации объектов. Применяемые алгоритмы обеспечивают возможность проведения большого числа вариантов расчетов и решения задач практической оптимизации конструктивных элементов при различных критериях оптимальности и ограничениях на геометрические и физические параметры. Численные эксперименты с использованием разработанных математических моделей позволяют снизить затраты на проектирование и сократить объем экспериментальных работ. Получен также ряд практических результатов и выработаны рекомендации по рациональному проектированию элементов СВЧ приборов и космических стержневых конструкций. В работе аналитически выведена формула для определения лучистого теплового потока от нагревателя кольцевой формы, которая используется при расчетах теплообмена в катодно-сеточных узлах.

На защиту выносятся:

- иерархическая система математических моделей для решения стационарной задачи теплообмена с учетом определяющего вклада его радиационной составляющей и задачи термоупругости в тонкостенных элементах конструкций изделий электронной техники;

- новый алгоритм решения нелинейной задачи стационарного теплообмена с учетом излучения в замкнутом тонкостенном профиле произвольной формы;

- практические рекомендации по проектированию узлов изделий электронной техники, выработанные в результате решения ряда оптимизационных задач, связанных с улучшением эксплуатационных показателей;

- результаты численного анализа температурных полей и тепловых деформаций тонкостенных стержневых элементов крупногабаритных космических конструкций при различной ориентации их относительно источника излучения.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях Харьковского политехнического института (Харьков, 1986-1990 гг.), на Второй Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов "Проблемы оптимизации в машиностроении" (Харьков, Алуста, 1986 г.), на Республиканской научно-технической конференции "Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела" (Харьков, 1989 г.), на научной сессии "Динамика и статика тонкостенных конструкций" (Тбилиси, 1990г.), на Международной конференции по крупногабаритным космическим конструкциям "ICOLASS-93" (Новгород, 1993г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в четырех печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения, занимающих 113 страниц машинописного текста и содержащих 23 рисунка и 2 таблицы, списка использованной литературы, включающего 52 наименования и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая ценность, приведена краткая характеристика работы.

В первом разделе рассматриваются элементы катодно-сеточных узлов электронных СВЧ приборов, условия их сборки и функционирования, описываются требования к ним и ограничения, накладываемые на параметры температурного поля и напряженно-деформированного состояния. Описываются математические модели различного уровня детализации для анализа процесса теплообмена и напряженно-деформированного состояния.

Рассматриваемые элементы представляют собой тонкостенную конструкцию сложной формы, состоящую из нескольких последовательно соединенных пластин и оболочек переменной толщины, во внутренней полости которой расположен нагреватель. Стенки элемента могут быть перфорированы отверстиями (рис. 1). Вся конструкция заключена в герметичную оболочку и находится в вакууме. В качестве математической модели первого уровня для описания процесса стационарного теплообмена выбирается теплопроводящая оболочка вращения с произвольным меридианом, нагреваемая тепловым потоком по внутренней поверхности и совершающая теплообмен излучением с внешней оболочкой. Наличие отверстий учитывается путем сведения перфорированного участка оболочки к эквивалентному сплошному участку переменной толщины. Для этого вводится специальная функция, характеризующая уменьшение площади поверхностей излучения и теплообмена. Предполагается, что толщина стенок оболочки значительно меньше размеров отверстий, и поэтому излучением с боковых поверхностей отверстий можно пренебречь.

Из уравнения теплового баланса выводится нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{1}{z\gamma} \frac{d}{ds} \left(z\gamma\lambda h \frac{dT}{ds} \right) = \sigma_0 \varepsilon (T^4 - T_0^4) - q(s), \quad (1)$$

где s - криволинейная координата, отсчитываемая вдоль меридиана, T - абсолютная температура, z - радиус, h - толщина,

λ - теплопроводность, ε - степень черноты поверхности элемента, T_0 - температура внешней оболочки, $q(s)$ - тепловой поток от нагревателя, σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана.

Важным достоинством уравнения (1) с позиций расчета температурного поля в элементе является универсальность описания конструктивных особенностей. Переход от одного типа конструктивного элемента к другому (коническая оболочка - цилиндрическая оболочка - круглая пластина) в рамках уравнения (1) осуществляется достаточно просто путем соответствующего назначения угла наклона нормали к оси симметрии и связанного с ним закона изменения $z(s)$. Это обстоятельство существенно упрощает технологию численной реализации и позволяет создать универсальную программу расчета элементов катодно-сеточного узла.

Граничные условия для уравнения (1) определяются конструкцией элемента. Обычно это условия первого рода:

$$T(\tilde{s}) = \tilde{T} \quad (2)$$

или третьего рода

$$-\lambda \left. \frac{dT}{ds} \right|_{s=\tilde{s}} = \alpha (T - T_{\text{вн}}), \quad (3)$$

где \tilde{s} - координата граничной точки, $T_{\text{вн}}$ - температура окружающей среды, α - коэффициент теплообмена.

Для решения задачи (1), (2), (3) используется алгоритм метода пристрелки, сводящий решение исходной краевой задачи к последовательному решению ряда начальных задач. На каждом шаге пристрелки подбирается неизвестное начальное значение с целью удовлетворения граничному условию на противоположном краю.

Наряду с описанной выше одномерной моделью теплообмена предлагается двумерная конечноэлементная модель как стационарного, так и нестационарного теплообмена. Конструкция представляется в виде системы плоских либо осесимметричных конечных элементов с учетом теплообмена излучением на границе.

Матричное уравнение нестационарного теплообмена для системы конечных элементов, содержащих N узлов, имеет вид:

$$C(T) \cdot \dot{T}(t) + \Lambda(T) \cdot T(t) = Q(t), \quad (4)$$

где $C(T)$ - матрица теплоемкости системы, зависящая от плотности и удельной теплоемкости материала, $\Lambda(T)$ - матрица теплопроводности системы, зависящая от температуры тела, T, \dot{T} - векторы узловых температур и их производных по времени, $Q(t)$ - зависящий от времени вектор внешних тепловых потоков.

Теплообмен излучением на границе учитывается введением специального двухузлового конечного элемента. Мощность тепловых потоков, излучаемых каждым из узлов i и j , полагается равной половине величины

$$Q_{изл} = \ell_m \sigma_0 \varepsilon T_m^4, \quad (5)$$

ℓ_m - расстояние между точками i и j , а $T_m = (T_i + T_j)/2$. Тепловые потоки излучения суммируются с внешним тепловым потоком. Это приводит к появлению неизвестных температур в правой части уравнения (4), что делает задачу существенно нелинейной. Для решения матричного уравнения (4), дополненного соответствующими краевыми условиями, применяется метод прямого пошагового интегрирования с итерационным уточнением решения на каждом шаге.

Проводится сравнение двух предлагаемых моделей для расчета температурного поля. Отмечается, что одномерная модель не позволяет учесть изменение температуры по толщине стенок конструкции, требует упрощений расчетной схемы (например, в точках пайки) и в то же время с максимальной точностью описывает теплообмен излучением с поверхности профиля. Конечноеlementная модель позволяет с любой степенью точности описать форму конструкции, однако излучение и внешний тепловой поток здесь учитываются менее точно. Отмечается также, что численные методы для каждой из моделей имеют различную степень точности. Таким образом, использование обеих моделей не только оправдано, но и необходимо для обеспечения достоверности результатов численного исследования в целом.

Расчет напряжений деформаций и перемещений, возникающих в элементах в результате нагрева, предлагается выполнять на основе линейных уравнений осесимметричных оболочек вращения. Задача сводится к системе шести основных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv}{ds} = -\nu \frac{\sin \psi}{z} U + \theta \cos \psi + \frac{\sin \psi \cos \psi}{Eh} (1-\nu^2) U + \frac{\sin^2 \psi}{Eh} (1-\nu^2) V + (1+\nu) \alpha \Delta T \sin \psi,$$

$$\frac{dU}{ds} = -\nu \frac{\cos \Psi}{z} U - \theta \sin \Psi + \frac{\cos^2 \Psi}{Eh} (1-\nu^2) U + \frac{\sin \Psi \cos \Psi}{Eh} (1-\nu^2) V + (1+\nu) \alpha \Delta T \cos \Psi,$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} M - \nu \frac{\cos \Psi}{z} \theta, \quad \frac{dV}{ds} = -\frac{\cos \Psi}{z} V, \quad (6)$$

$$\frac{dU}{ds} = \frac{Eh}{z^2} U - \frac{(1-\nu) \cos \Psi}{z} U + \nu \frac{\sin \Psi}{z} V - \frac{Eh}{z} \alpha \Delta T,$$

$$\frac{dM}{ds} = \frac{Eh^3}{12} \frac{\cos^2 \Psi}{z^2} \theta + U \sin \Psi - \frac{(1-\nu)}{z} \cos \Psi M - \cos \Psi V,$$

где u , v - перемещения в направлении оси симметрии оболочки и в направлении, перпендикулярном ей; U , V - силы в направлениях, аналогичных перемещениям; θ - угол поворота нормали к срединной поверхности в плоскости меридиана оболочки; M - меридианальный изгибающий момент; s - координата, отсчитываемая вдоль меридиана оболочки; Ψ - угол наклона нормали к оси симметрии; h - толщина; E , ν , α - модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения материала; ΔT - изменение температуры.

Граничные условия, замыкающие систему (6), определяются конкретным характером закрепления катодного узла и для различных случаев имеют вид:

- свободный край $U = V = M = 0$;
- жесткое защемление $u = v = \theta = 0$;
- точка, лежащая на оси симметрии, $v = \theta = V = 0$

Путем решения краевой задачи (6), (7) находятся основные неизвестные u , v , θ , U , V и M , с помощью которых могут быть подсчитаны деформации срединной поверхности в меридианальном и окружном направлениях ϵ_{10} и ϵ_{20} , а также параметры изменения кривизн χ_1 и χ_2 :

$$\epsilon_{10} = \frac{1-\nu^2}{Eh} U \cos \Psi - \nu \frac{U}{z} + (1+\nu) \alpha \Delta T, \quad \epsilon_{20} = \frac{U}{z},$$

$$\chi_1 = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} M - \frac{V}{z} \theta \cos \Psi, \quad \chi_2 = \frac{\theta}{z} \cos \Psi. \quad (8)$$

Напряжения согласно закону Гука для двухосного напряженного состояния запишутся в виде:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2 - \alpha (1+\nu) \Delta T), \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1 - \alpha (1+\nu) \Delta T),$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon_{10} + \varkappa \varkappa_1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{20} + \varkappa \varkappa_2$; координата \varkappa отсчитывается по нормали к срединной поверхности, $-h/2 \leq \varkappa \leq h/2$.

Особенностью рассматриваемого класса конструкций является отсутствие внешних силовых факторов, вследствие чего удается исключить из рассмотрения первое и четвертое уравнения системы (6). Интегрирование четвертого уравнения дает $V = \text{const}/2$, откуда для любого из вариантов граничных условий следует $V = 0$. Поскольку переменная ν не входит в оставшиеся четыре уравнения, ее можно вычислить после того как будут определены значения основных переменных u , θ , ψ и M .

С точки зрения численной реализации система (6) обладает теми же достоинствами, что были отмечены для уравнения (1). Кроме того, легко учитывается зависимость механических свойств материалов от температуры. Задача решается методом ортогональной прогонки. Число точек ортогонализации определяется автоматически путем оценки числа обусловленности матрицы системы алгебраических уравнений, служащих для определения недостающих граничных условий.

Рассматривается вопрос об учете отверстий. Их наличие нарушает осесимметричность задачи, и поэтому не позволяет получить точное решение в рамках одномерной модели. Предлагается замена участка, содержащего отверстия, некой эквивалентной сплошной оболочкой с приведенными параметрами. Подбор эквивалентных параметров, определяющих жесткость оболочки на растяжение и изгиб, для участков с отверстиями выполняется путем сопоставления результатов расчета с данными, полученными конечноэлементным анализом пластинчато-оболочечной модели с отверстиями.

В этом же разделе отмечается возможность применения предлагаемых моделей теплообмена для расчета температурных полей в тонкостенных элементах крупногабаритных космических конструкций.

Показано, что процесс стационарного теплообмена в тонкостенных стержнях сложного профиля описывается уравнением (1) в предположении отсутствия переноса тепла вдоль оси стержня.

Во втором разделе проводится качественный анализ нелинейного дифференциального уравнения стационарного теплообмена с учетом излучения для тонкостенных стержней замкнутого профиля. Уравнение (1) записывается в безразмерном виде

$$\frac{d}{d\xi} (\Lambda H \frac{d\theta}{d\xi}) = A(\theta^4 - \theta_0^4) - BQ(\xi); \quad (10)$$

$$\xi = s/s^*; \quad \theta = T/T^*; \quad \Lambda = \frac{\lambda}{\lambda^*}; \quad H = h/h^*; \quad Q = q/q^*;$$

$$A = \frac{\epsilon_0 \epsilon s^{*2} T^{*3}}{\lambda^* h^*}; \quad B = \frac{q^* s^{*2}}{\lambda^* h^* T^*},$$

где s^* , λ^* , h^* , T^* и q^* - характерные величины длины контура, теплопроводности, толщины, температуры и мощности внешнего теплового потока, и с помощью замены $X = \xi \sqrt{A}$ приводится к нормальной форме

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{\Lambda(x)H(x)} \varphi, \quad (11)$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \theta^4 - \theta_0^4 - D^4 Q(x);$$

$$D^4 = \frac{B}{A} = \frac{\beta q^*}{\epsilon \epsilon_0 T^{*4}}.$$

Функции θ и φ представляют собой безразмерные температуру и градиент, а X - безразмерную координату. Общее решение системы (11) изображается на фазовой плоскости в системе координат $\theta - \varphi$. В общем случае система (11) неавтономна, так как функции Λ , H и Q явным образом зависят от X . Однако для стержня с постоянной теплопроводностью и толщиной при $Q \equiv 1$ она становится автономной и легко поддается качественному анализу:

$$\frac{d\varphi}{d\theta} = \frac{\theta^4 - D^4}{\varphi}, \quad (12)$$

(здесь для простоты полагается $\theta_0 = 0$) и на фазовой плоскости (рис. 2) можно выделить две особых точки: центр $(-D, 0)$ и седло $(D, 0)$.

Для определения температурного поля в профиле система (11) дополняется краевыми условиями, которые в данном случае являются условиями замкнутости

$$\varphi(x_0) = \varphi(x_1), \quad \theta(x_0) = \theta(x_1). \quad (13)$$

Единственным физически реализуемым решением задачи (12), (13) есть точка фазовой плоскости $(D, 0)$, поскольку любые другие замкнутые траектории проходят через область отрицательных температур. Это решение соответствует равномерно нагретому профилю, находящемуся в состоянии теплового равновесия с окружающей средой.

При переменном внешнем тепловом потоке $Q \neq const$ автономность системы нарушается, но при каждом фиксированном значении X мгновенное смещение от некоторой точки на фазовой плоскости будет осуществляться по фазовой траектории из семейства, аналогичного показанному на рис. 2, с тем лишь отличием, что значение D будет изменяться в зависимости от X . Решение задачи (11), (13) строится как результат серии бесконечно малых перемещений по каждой из таких мгновенных траекторий.

Анализируется возможное поведение решения задачи (11), (13), в результате чего выделяется область допустимых значений, за пределы которой не могут выходить точки фазовой траектории, отвечающие физически реализуемому решению. Эта область ограничена кривыми предельных циклов, соответствующими максимальному и минимальному значениям D (рис. 3).

Раскрывается причина чувствительности численного решения задачи Коши к малому изменению начальных значений. Описывается эффективный алгоритм численного решения задачи (11), (13), опирающийся на выявленные свойства системы. На первом шаге алгоритма осуществляется поиск удовлетворительного начального приближения, под которым понимается некоторая фазовая траектория, полностью принадлежащая области допустимых значений, но не обязательно обеспечивающая выполнение условий замкнутости (13). На втором этапе производится уточнение численного решения методом Ньютона до обеспечения выполнения этих условий с заданной точностью.

В третьем разделе проводится сравнение результатов расчетов с полученными экспериментальными данными; ставится задача идентификации модели и реального объекта исследования, уточняются параметры моделей, описываются варианты расчетов, проведенные с целью определения влияния параметров конструкций на температурное поле и напряженно-деформированное состояние.

Идентификация математической модели стационарного теплообмена для тонкостенного стержня сложного поперечного сечения проводится путем сопоставления результатов расчетов с данными, полученными из специально поставленного эксперимента. Над консольно закрепленным отрезком стержня располагалась нить накаливания, и вся система помещалась в вакуум. В характерных точках профиля устанавливались термометры. После выхода системы на стационарный тепловой режим измерялись значения температуры и прогиб на 1 м длины. Исследовались различные варианты стержней при различной мощности излучателя. Закон изменения теплового потока, падающего на поверхность профиля, рассчитывался в соответствии с геометрией системы стержень - нагреватель. Степень черноты поверхности стержня и коэффициент поглощения измерялись предварительно. Прогиб стержня вычислялся путем замены температурного нагружения эквивалентным силовым, что соответствует чистому изгибу под действием сосредоточенных на концах стержня моментов, величина которых

$$\begin{aligned} M_x &= \int_F E \alpha y \Delta T dF, \\ M_y &= \int_F E \alpha x \Delta T dF, \end{aligned} \quad (14)$$

где E - модуль упругости, α - коэффициент температурного расширения, x и y - главные оси сечения, F - площадь поперечного сечения стержня. Расчетные и экспериментальные данные для профиля, изображенного на рис. 4 при мощности тока в нити накаливания 1.6 кВт/м представлены в таблице 1.

Приводятся результаты численного исследования различных вариантов теплозащитных покрытий, которые существенно изменяют степень черноты поверхности стержня. Для уменьшения теплового искривления стержневых элементов рекомендуется покрывать их поверхность материалами, имеющими малую поглащательную способность

и высокую теплопроводность. Расчеты показали, что этот путь более эффективен, чем увеличение степени черноты и толщины стенок профиля.

Сделан вывод о пригодности предлагаемой математической модели для расчета температурных полей и температурных деформаций в тонкостенных стержнях замкнутого профиля. Проведен анализ влияния ориентации профиля относительно источника излучения. Пример температурного поля для овального профиля при параллельном тепловом потоке, направление которого не совпадает с осями симметрии овала, приведен на рис. 5.

Таблица 1.

Сравнительные данные по неравномерному нагреву стержня (рис. 4)

Материал, покрытие.	прогиб мм		T max °C		T max - T min °C	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
1. Сталь 36 НХТЮ без покрытия	9	9.8	140	135	55	62
2. Сталь 36 НХТЮ без покрытия (повернут на 90°)	6	6.6	100	97	40	44
3. Сталь 36 НХТЮ покрытие ВИТЭФ	7	6.9	106	98	45	49
4. Сталь 36 НХТЮ покрытие ВИТЭФ (повернут на 90°)	5	4.6	75	73	30	32

Хорошие результаты, полученные при анализе теплообмена с излучением в тонкостенных замкнутых стержнях, позволяют применить разработанный подход для других классов конструкций. На примере одного из вариантов катодно-сеточного узла (рис. 1) ставилась задача идентификации математической модели, описываемой уравнением (1). При помощи пирометра была определена температура в центре и на краю плоского участка сетки, равная соответ-

экспериментальных данных при варьировании параметрами, входящими в уравнение (1). В предположении постоянства теплового потока, падающего на сетку, вдоль ее радиуса удовлетворительные результаты получены не были. Решена задача уточнения вида функции теплового потока $q(s)$, выведена аналитическая формула для ее вычисления. Полученный результат позволил добиться хорошего совпадения температуры, найденной расчетным путем, с экспериментальной. На его основе выработаны рекомендации по уменьшению интенсивности теплового воздействия на сетку при конструировании катодов.

Проведен анализ влияния отверстий в плоском участке сетки на нарушении осесимметричности задачи теплообмена путем расчета этого участка по конечноэлементной модели. Установлено, что это нарушение незначительно. Сравнительные результаты расчета по одномерной и двумерной моделям показаны на рис. 6.

Проанализировано влияние геометрии и параметров конструкции сетки на температурное поле в ней. Установлено решающее влияние толщины сетки, диаметра отверстий и краевых условий на характер температурного поля. На рис. 7 показаны графики распределения температуры по радиусу плоского участка сетки для различных диаметров отверстий при сохранении их числа и расположения в соответствии с рис. 6.

На основании сравнения решений задачи термоупругости для нагретой сетки по оболочечной и конечноэлементной моделям сделан вывод, что оболочечная модель, хорошо описывая перемещения, допускает погрешность при вычислении напряжений вблизи отверстий. Отмечается возможность управления качеством конструкции катодно-сеточного узла путем варьирования его параметрами.

В четвертом разделе ставятся и решаются некоторые задачи практической оптимизации для элементов СВЧ приборов. Анализ теплообмена и термоупругости производится на основе оболочечных моделей.

Ставится следующая оптимизационная задача, условно названная "задачей о холодных размерах": определить исходную форму узла, который в результате эксплуатационного нагрева примет форму, минимально отличающуюся от заданной, при прочностных ограничениях на напряжения. Формальная постановка имеет вид: пусть $\ell_0(s)$ -

исходное ("холодное") очертание оболочки, а $l_T(s)$ - желаемая форма меридиана в нагретом состоянии, которая в наибольшей степени соответствует функциональному назначению узла в составе электронного прибора. Отличие исходного очертания оболочки от заданного нагретого характеризуется полями смещений $u_o(s), v_o(s)$. Функционал качества формируется в виде нормы отличия истинного поля перемещений при нагревании $u(s), v(s)$, от желаемых величин $u_o(s), v_o(s)$:

$$J = \int_l [(u_o - u)^2 + (v_o - v)^2] ds. \quad (15)$$

Минимизация такого функционала будет соответствовать поиску исполнения катодно-сеточного узла, в наибольшей мере отвечающего цели его изготовления. В качестве варьируемых переменных выберутся величины, наиболее значимые для рассматриваемого объекта: исходная форма меридиана $l_o(s)$, задаваемая законом изменения угла $\Psi(s)$; толщина $h(s)$; длины меридиана различных деталей держателя. На варьируемые переменные накладываются ограничения, отражающие конструктивные и технологические требования.

Задачи практической оптимизации рассматриваются на примере одного из вариантов катодно-сеточного узла (рис. 1). Он представляет собой цилиндрический катод, параллельно поверхности которого расположена сетка - молибденовая пластинка с двумя рядами отверстий. Держатель сетки выполнен в виде пластинчато-оболочечной конструкции из молибденовых и медных деталей. По условиям эксплуатации изделия необходимо, чтобы толщина сетки была по возможности минимальной, а диаметр заданных отверстий - максимальным. Температура молибденовых и медных деталей не должна превышать заданных значений T_{max} . Требуется сохранение сеткой плоской формы после нагрева при обеспечении условия прочности.

Управление качеством описываемого узла проводится на основе решения последовательного ряда задач безусловной и условной оптимизации. На первом этапе минимизируется толщина сетки при ограничении максимальной температуры и фиксированном диаметре отверстий. Эта задача не требует анализа напряженно-деформированного состояния. Результаты ее решения в виде графиков зависимости h_{min} от диаметра отверстий и значения T_{max} приведены на рис. 8. Аналогичный вид имеет решение при ограничении радиально-

го перепада температур на сетке. Затем решается задача безусловной минимизации разности осевых перемещений центра и края сетки при варьировании длиной молибденовой детали держателя, примыкающего к сетке (рис. 9). Анализ полученных результатов позволяет выбрать рациональные параметры узла в первом приближении.

В дальнейшем показано, что для линейной задачи термоупругости проблема "холодных размеров" может быть сведена к более простой задаче оптимизации, условно названной "задачей о формоустойчивости". Отклонение "нагретой формы" узла от исходной характеризуется функционалом

$$\int_{\ell} \theta^2 ds, \quad (16)$$

где θ - угол поворота нормали. При обеспечении "формоустойчивости" "холодные размеры" узла могут быть найдены путем корректировки исходных значений с учетом линейных температурных перемещений, полученных из решения задачи термоупругости.

Ставится задача оптимизации, состоящая в поиске варьируемых переменных, минимизирующих на множестве решений краевых задач (1), (2) и (6), (7) функционал (15), при обеспечении прочностных и технологических ограничений. Приведен пример решения этой задачи при варьировании параметром $h(s)$. Оптимизационный эффект для полученного варианта конструкции проверен и подтвержден расчетами по конечноэлементным моделям. В этих расчетах отмечено локальное превышение допустимого уровня напряжений в области перемычек между отверстиями первого ряда.

В приложении приведено аналитическое решение задачи определения мощности лучистого теплового потока от источника кольцевой формы, которое используется при рассмотрении задачи теплообмена для катодно-сеточного узла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана иерархическая система математических моделей для решения стационарной задачи теплообмена с учетом определяющего вклада его радиационной составляющей и задачи термоупругости в тонкостенных элементах конструкций изделий электронной техники.

2. Сформирован и программно реализован ориентированный на использование ПЭВМ комплекс алгоритмов численного решения задач теплообмена и термоупругости для предложенных математических моделей различного уровня детализации объектов.

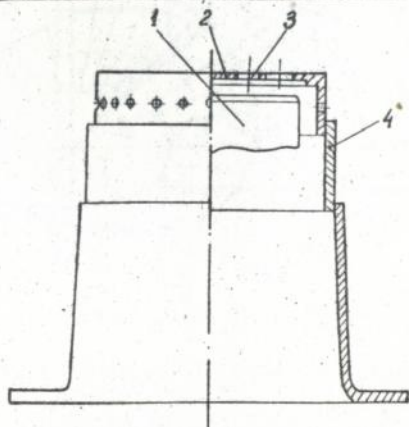
3. Установлена возможность практической оптимизации рассмотренных классов конструкций по параметрам температурного поля и напряженно-деформированного состояния при варьировании их размерами и формой на базе разработанных математических моделей.

4. На основе решения ряда оптимизационных задач, связанных с улучшением эксплуатационных показателей изделий электронной техники, выработаны рекомендации по рациональному проектированию катодно-сеточных узлов.

5. Разработан новый алгоритм решения нелинейной задачи стационарного теплообмена с учетом излучения в замкнутом тонкостенном профиле произвольной формы.

6. Проведен численный анализ температурных полей и тепловых деформаций тонкостенных стержней при различной ориентации их относительно источника излучения.

7. Проведен анализ влияния формы, размеров, механических характеристик материалов и параметров теплообмена на температурное деформирование стержневых элементов крупногабаритных космических конструкций.



- 1 - катод
- 2 - сетка
- 3 - отверстия
- 4 - держатель

Рис. 1. Схема катодно-сеточного узла

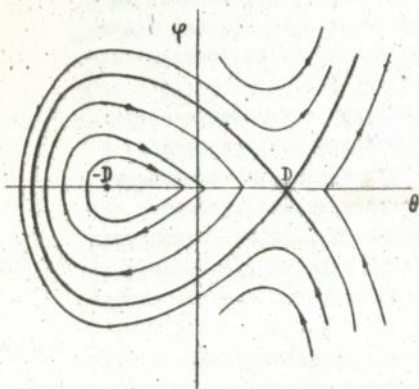


Рис. 2.

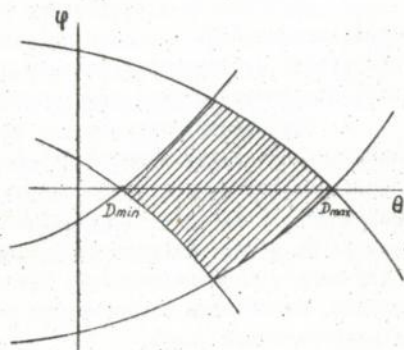
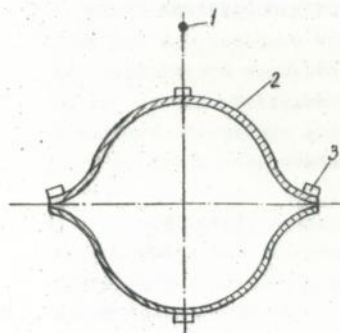


Рис. 3



1 - излучатель, 2 - профиль,
3 - точки установки термопар
Рис. 4.

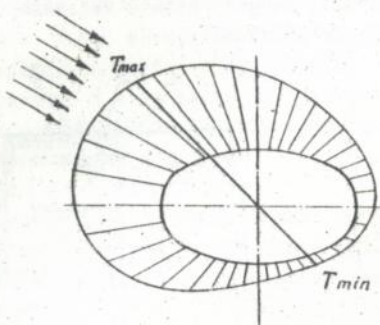


Рис. 5

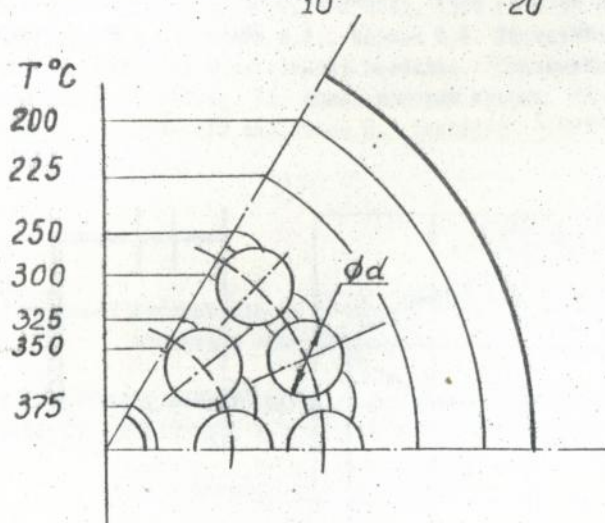
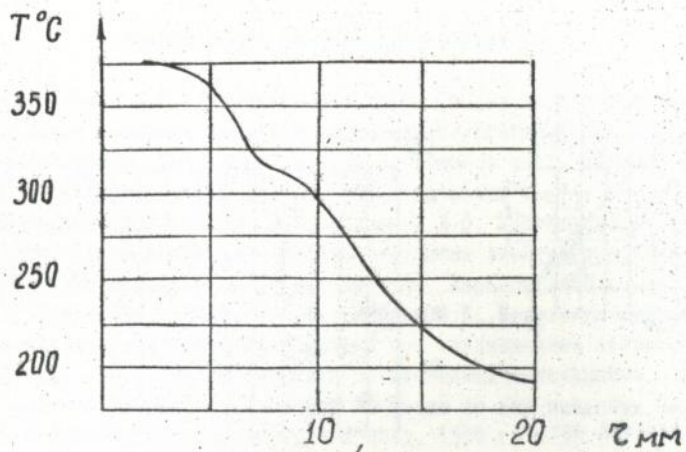
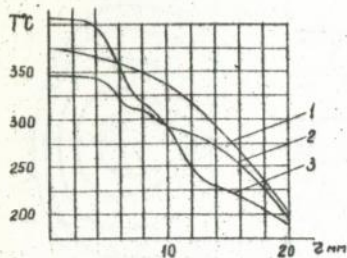


Рис. 6



- 1 - отверстий нет,
 2 - $d = 1$ мм,
 3 - $d = 2$ мм.

Рис. 7.

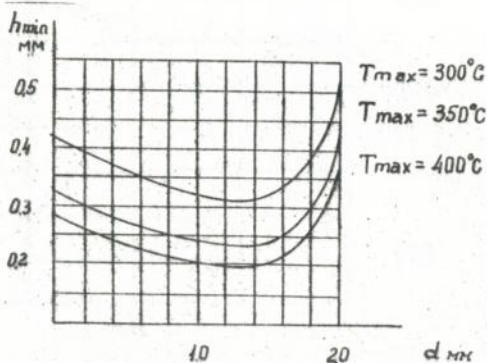
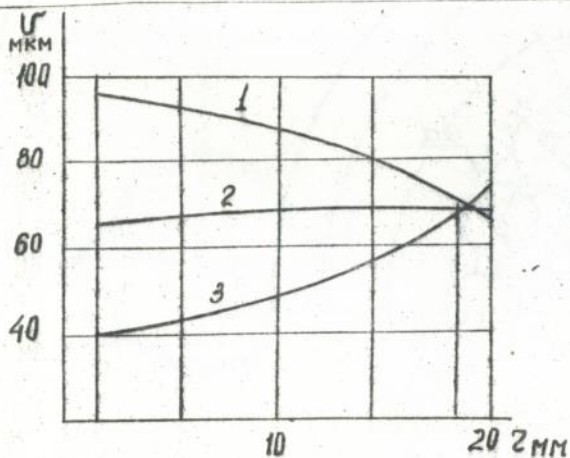
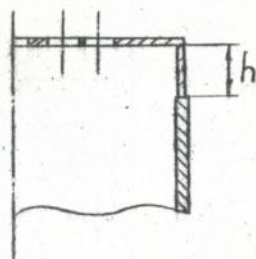


Рис. 8



- 1 - $h = 10$ мм, 2 - $h = 4$ мм, 3 - $h = 0$ мм.

Рис. 9.



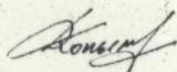
СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Копылов Д.В. Оптимизация температурного поля в составных тонкостенных осесимметричных конструкциях. // Проблемы оптимизации в машиностроении. Тез. докл. Второй Всесоюзной школы молодых ученых и специалистов 16-22 мая 1986 г. Харьков с. 94.

2. Гринев В.Б., Гарев О.Л., Копылов Д.В. Моделирование температурного поля в элементе типового изделия электронной техники. // Динамика и прочность машин. Вып. 48. Харьков 1988 с. 7-12.

3. Гарев О.Л., Копылов Д.В., Марков А.В. Моделирование поведения крупногабаритных конструкций при стационарном тепловом воздействии. // Статика и динамика тонкостенных конструкций. Сб. докл. научной сессии, посвященной 75-летию со дня рождения академика О.Д.Ониашвили. Тбилиси, 4-8 июня, 1990 г. с.36.

4. Гарев О.Л., Копылов Д.В., Марков А.В. Расчет температурных полей в замкнутых тонкостенных профилях. // Статика и динамика тонкостенных конструкций. Сб. докл. научной сессии, посвященной 75-летию со дня рождения академика О.Д.Ониашвили. Тбилиси, 4-8 июня, 1990 г. с.37.



Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Копылов Дмитрий Вадимович

Ответственный за выпуск к.т.н., доц. Хавин В.Л.

Подписано к печати "11" мая 1993 г. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная, Усл. печ. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ № 1558.

Харьковское Межвузовское арендное полиграфическое предприятие
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115.

465648

AB 27.476

AB 27.476