

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

Институт проблем машиностроения

На правах рукописи

КОСТИКОВ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ  
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИХ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ

05.14.05 - теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Харьков - 1996



00759749 (+)

Диссертация является руко

Работа выполнена в отде

механических процессов Института проблем машиностроения  
НАН Украины.

Научный руководитель: член-корреспондент НАН Украины,  
доктор технических наук, профессор,  
Мацевитый Юрий Михайлович.

Научный консультант: кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Цакания Олег Семенович.

Официальные опоненты: доктор технических наук, профессор,  
Малыренко Виталий Андреевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
Иванов Виталий Анатольевич.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
радиотехнических измерений,  
Минмашпром Украины, г. Харьков.

Защита состоится 15 мая 1996 г. в 14 часов в аудитории 11 этажа  
на заседании специализированного ученого совета Д 02.18.03 в  
Институте проблем машиностроения НАН Украины по адресу:  
310046, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10.

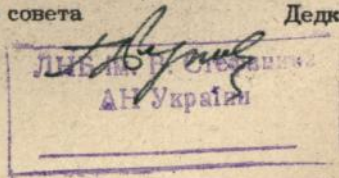
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
проблем машиностроения НАН Украины по адресу: 310046, г.  
Харьков, ул. Пожарского, 2/10.

Автореферат разослан "12" апреля 1996 г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

Дедков Г.В.



## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В настоящее время во многих отраслях народного хозяйства и в быту широко используется электротермическое оборудование. Наиболее распространено электротермическое оборудование косвенного нагрева. В нем теплота выделяется в специальных нагревателях при протекании по ним электрического тока и передается нагреваемому телу по законам теплопередачи.

В последнее время наравне с нагревателями других типов начали активно применять металлокерамические нагревательные элементы (МКНЭ), изготавливаемые методом обжига металлизированных заготовок из пластифицированной керамики. Особенно активно они внедряются в радиоэлектронной аппаратуре, электротермическом оборудовании, применяемом в пищевой промышленности, бытовых нагревательных приборах. По сравнению с другими типами нагревателей МКНЭ обладает рядом преимуществ: работоспособностью в агрессивных средах и при высокой температуре, соответствие экологическим стандартам и условиям электрической безопасности, возможностью унификации как отдельных МКНЭ, так и нагревательных блоков на их основе. Эти преимущества открывают перспективу широкого внедрения МКНЭ.

При работе нагревательного элемента могут возникнуть большие тепловые нагрузки, приводящие к отказу нагревателя или другого узла аппаратуры, что повлечет за собой выход из строя всей системы. Поэтому при создании устройств, использующих МКНЭ в качестве нагревателей, необходим

нетрадиционный подход к обеспечению тепловых режимов и проектированию МКНЭ.

Тепловое состояние МКНЭ можно исследовать методами физического и математического моделирования. В последние годы существенно возрастает роль математического моделирования, эффективность которого во многом зависит от адекватности принятой математической модели, и выбора метода решения соответствующей тепловой задачи.

Постановка этих задач и их решение для таких сложных и многовариантных объектов, как МКНЭ, является актуальной проблемой. Следовательно актуальна и тема настоящей работы, посвященной исследованию тепловых процессов и проектированию таких нагревателей с учетом тепловой надежности.

В настоящее время на Украине разработка и проектирование устройств, использующих МКНЭ, проводится в Научно - исследовательском технологическом институте приборостроения (НИТИП) под руководством В.Е.Овчаренко. Научное обеспечение этих работ - отделом моделирования тепловых и механических процессов Института проблем машиностроения (ИПМаш) НАН Украины, руководимым Ю.М.Мацевитым.

Диссертационная работа выполнялась с 1992 по 1995 годы в отделе моделирования тепловых и механических процессов ИПМаш НАН Украины в соответствии с г/б темой "Теплообмен в энергетических установках, технологических процессах и объектах радиоэлектроники" (№ госрегистрации 01910019862) и х/д с НИТИП "Разработка методики проектирования металлокерамических нагревателей с учетом тепловой надежности" (№ госрегистрации 0192U031190).

Целью работы является исследование тепловых процессов в МКНЭ и создание научных основ их проектирования.

Основные задачи. Разработка методов и алгоритмов моделирования и идентификации тепловых процессов в МКНЭ. Создание методики их проектирования из условий тепловой надежности.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели исследования применялись методы математического моделирования, методы теории теплопроводности, методы решения обратных задач и методы оптимизации.

Научная новизна. В диссертации впервые получены лично соискателем новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Методика расчета температурных полей МКНЭ и определения его технических характеристик, позволяющая решать двумерную нелинейную задачу теплопроводности в конечной пластине со сложной неявной зависимостью плотности тепловыделения от координат и температуры.
2. Методика определения интенсивности теплообмена на поверхностях МКНЭ по результатам теплофизического эксперимента.
3. Критерии применимости двумерной математической модели и учета неравномерности размещения внутренних источников теплоты.
4. Методика определения диапазона допустимых для МКНЭ режимных параметров.
5. Результаты исследования зависимости основных технических характеристик МКНЭ от режимных параметров.

6. Методика проектирования МКНЭ из условий их тепловой надежности, позволяющая сократить объем вычислений при решении обратной геометрической задачи теплопроводности.

7. Программный комплекс для определения основных технических характеристик МКНЭ и диапазона допустимых режимных параметров; система автоматизированного проектирования МКНЭ.

Достоверность изложенных методов и результатов исследования подтверждается удовлетворительным совпадением полученных решений с экспериментальными данными, а также надежной работой МКНЭ, разработанных по предлагаемым методикам.

Теоретическая ценность работы заключается в создании методов и алгоритмов решения прямых и обратных задач теплопроводности применительно к МКНЭ.

Практическая ценность и использование результатов работы состоит в том, что по полученным методикам с помощью разработанных программных продуктов можно проектировать и испытывать МКНЭ для различных приборов и устройств. Так методика определения диапазона допустимых режимных параметров позволяет проводить унификацию МКНЭ, в результате чего существенно сокращается время проектирования и доработки приборов и устройств, использующих МКНЭ

Результаты, полученные в диссертации, используются на предприятии-изготовителе МКНЭ - НИТИП (система автоматизированного проектирования МКНЭ, результаты исследования допустимых диапазонов режимных параметров МКНЭ). По заказу НПО "ХАРТРОН" было разработано программное обеспечение для проведения режимных испытаний нагревателей и определения их технических характеристик.

Непосредственно автором были спроектированы МКНЭ для теплоэлектровентиляторов бытового назначения.

Апробация работы. Основные материалы и результаты работы докладывались на симпозиуме по математическому моделированию "1. MATHMOD VIENNA" (Вена, 1994г.), научно-технической конференции "Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки" (Львов, 1995 г.), европейском конгрессе по моделированию "EUROSIM'95" (Вена, 1995г.)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работы, из них 2 статьи, 1 доклад и 1 тезисы докладов.

В отдельных разделах диссертации используются результаты научных работ, полученные с соавторами. Личное участие в этих работах определяется следующим образом: в работах [1] и [3] проведены исследования условий применимости двумерной математической модели для МКНЭ, в работе [2] предложена методика определения параметров резистивных элементов и их компоновки по зонам и по толщине нагревателя с помощью анализа теплового состояния и допустимых конструкторско-технологических ограничений и проведены исследования точностных характеристик системы автоматизированного проектирования МКНЭ, в работе [4] предложены методика определения тепловых и электрических характеристик МКНЭ, методика определения диапазона допустимых режимных параметров нагревателя и проведены исследования по выбору аппроксимирующих функций для идентификации интенсивности теплообмена на поверхности нагревательного элемента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, 21 рисунка, 87 стр. основного текста, всего 119 стр.

Работа является органической составляющей комплекса исследований, проводимых ИПМаш НАН Украины и НИТИП по научному сопровождению и внедрению новой технологии изготовления изделий радиоэлектроники из металлизированной керамики.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, имеющей обзорный и постановочный характер, рассмотрены структура и основные технические характеристики МКНЭ, способы передачи тепла от металлокерамических нагревателей к нагреваемым телам и основные виды отказов нагревателей. Сделан анализ методов физического и математического моделирования тепловых процессов. Рассмотрены методы решения прямых и обратных задач теплопроводности, изложенные в работах О.М. Алифанова, Дж. Века, Л.А. Коздобы, Ю.М. Мацевитого, А.Н. Тихонова и др.

Основные виды отказов МКНЭ можно разбить на три группы: разрушение керамической пластины из-за превышения допустимой величины термонапряжений, которая определяется допустимым градиентом температуры нагревательного элемента, разрыв резистивной дорожки, вследствие большой величины плотности электрического тока и разрушение узлов крепления нагревателя из-за высокой температуры на поверхности МКНЭ. Поэтому для надежной работы нагревательного элемента необходимо соблюдение следующих трех условий

$$(\text{grad } T)_{\text{max}} = \varphi_1(P) < (\text{grad } T)_{\text{доп}} \quad (1)$$

$$I = \varphi_2(P) < I_{\text{доп}}, \quad (2)$$

$$T = \varphi_3(P) < T_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где  $T$  - температура нагревательного элемента;  $I$  - сила электрического тока;  $P$  - вектор первичных параметров, куда входят коэффициент теплоотдачи на поверхности МКНЭ, температура окружающей среды, коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность керамики, геометрические размеры керамической пластины и резистивной дорожки, удельное электрическое сопротивление;  $\varphi$  - функции, устанавливающие зависимость между первичными параметрами и температурой, градиентом температуры и силой электрического тока; индекс "доп" означает максимально допустимое значение соответствующей величины, при котором наступает отказ нагревательного элемента.

Проведенный обзор литературы позволил сформулировать цель диссертационной работы и выбрать методический подход, наиболее целесообразный для задач исследования тепловых процессов в МКНЭ и проектирования нагревательных элементов.

Вторая глава посвящена моделированию и идентификации тепловых процессов в МКНЭ.

В общем случае теплофизический процесс в нагревательном элементе, имеющем вид пластины, описывается трехмерным нелинейным уравнением теплопроводности. Такая постановка задачи предъявляет повышенные требования к вычислительным средствам, используемым для ее решения. Одним из способов сокращения времени счета является снижение размерности уравнения. Это можно сделать, если пренебречь перепадом температуры по толщине МКНЭ. При этом необходимо обратить

внимание на то, чтобы снижение размерности уравнения не привело к значительному увеличению погрешности результатов.

Для оценки применимости двумерной тепловой модели нагревательного элемента был выбран критерий - относительный перепад температуры по толщине пластины  $\Theta$ . Для того чтобы двумерная тепловая модель МКНЭ была адекватной, необходимо, чтобы этот перепад был меньше допустимой величины  $\Theta_{\text{доп}}$ .

Проведенные исследования зависимости относительного перепада температуры от режимных параметров нагревателя показали, что увеличение числа уровней размещения резистивного элемента в теле МКНЭ приводит к увеличению области режимных параметров, при которых возможно применение двумерной модели. Результаты таких исследований целесообразно представлять в виде диаграмм. Задавшись определенным  $\Theta_{\text{доп}}$ , по ним определяют при каких режимных параметрах допустимо применять двумерную тепловую модель.

Такая модель МКНЭ описывается уравнением теплопроводности

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\alpha_1}{\delta} (T - T_1) - \frac{\alpha_2}{\delta} (T - T_2) + \frac{q_s(x, y, T)}{\delta} \quad (5)$$

где  $T(x, y)$  - температура нагревателя;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи у поверхностей  $x=0$  и  $x=\delta$  соответственно,  $T_1$  и  $T_2$  - температура окружающей среды у этих поверхностей,  $q_s$  - удельная поверхностная мощность источников теплоты. В случае стационарной задачи левая часть уравнения (5) обращается в 0.

На торцах пластины нагревателя в данной работе брались граничные условия третьего рода.

Удельная мощность источников теплоты  $q_s$  является функцией координат и температуры. В каждом нагревательном элементе можно выделить прямоугольные зоны, в которых резистивный элемент располагается регулярным образом. В работе исследовалось влияние неравномерности  $q_s$  (то есть учета отдельных дорожек) на температурное поле МКНЭ. В результате решения одномерной задачи теплопроводности в направлении, перпендикулярном расположению дорожек в зоне, было получено аналитическое выражение для максимального значения градиента температуры  $G$  между двумя соседними дорожками

$$G = \frac{q}{2\lambda\delta\sqrt{a}} \frac{\exp(2l\sqrt{a}) - \exp(2d\sqrt{a}) - \exp(2(l-d)\sqrt{a}) + 1}{\exp(2l\sqrt{a}) - 1}, \quad (5)$$

где  $a = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\lambda\delta}$ ;  $q$  - удельная поверхностная мощность резистивной дорожки;  $l$  - половина шага между дорожками;  $d$  - полуширина дорожки.

Если величина  $G$  невелика по сравнению с максимальным градиентом температуры на всем нагревателе, то  $q_s$  можно считать равномерно распределенной в данной зоне, в противном случае при определении  $q_s$  необходимо учитывать расположение дорожек. Величину  $G$  можно использовать и как добавку к максимальному градиенту температуры нагревателя, полученному в результате решения задачи теплопроводности с  $q_s = \text{const}$  в каждой зоне.

При решении прямой задачи теплопроводности для нагревательного элемента в диссертационной работе применялся

метод конечных разностей. При этом решение нелинейной задачи теплопроводности проводилось по итерационной и безытерационной схемам. Значение величины  $q_s$  для каждого элементарного объема непосредственно из распределения температуры на предыдущей итерации определить не удастся, так как мощность внутренних источников теплоты зависит не только от сопротивления резистивного элемента, но и от силы электрического тока, которая, в свою очередь, зависит от сопротивления. Поэтому значение  $q_s$  на  $k$ -й итерации необходимо определять по формулам

$$R_j = \rho(T_j^{(k-1)}) \frac{l_j}{\sigma_j}, \quad R = \sum_{j=1}^M R_j, \quad I = \frac{U}{R}, \quad P_j = I^2 R_j, \quad q_{sj} = \frac{P_j}{V_j} \delta, \quad (6)$$

где  $R_j$  - сопротивление резистивного элемента в элементарном объеме;  $\rho(T)$  - удельное сопротивление резистивного элемента;  $T_j^{(k-1)}$  - температура элементарного объема на  $(k-1)$ -й итерации;  $l_j$  и  $\sigma_j$  - длина и площадь сечения проводника в элементарном резистивном элементе;  $R$  - полное сопротивление резистивного элемента;  $M$  - число узлов разностной сетки;  $I$  - сила электрического тока;  $U$  - электрическое напряжение;  $P_j$  - мощность, выделяемая в узле;  $V_j$  - элементарный объем.

Используя формулы (6) можно легко определить такие важные характеристики МКНЭ, как потребляемая электрическая мощность, сила электрического тока и электрическое сопротивление. Мощность тепловыделения можно определить после нахождения температурного поля нагревательного элемента по тепловому балансу.

При моделировании тепловых процессов и при проектировании МКНЭ необходимо знать интенсивность теплообмена на поверхности керамической пластины, то есть коэффициенты теплоотдачи. В работе приведены новая методика определения локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности нагревателя по результатам измерения температуры, основанная на методе спектральных функций, и рекомендации по выбору количества и мест точек термометрирования.

Третья глава посвящена исследованиям зависимости основных технических характеристик МКНЭ от режимных параметров при помощи вычислительного эксперимента. Рассматривались как стационарные, так и нестационарные тепловые процессы в МКНЭ. Проводились исследования влияния различных воздействий на тепловые (максимальный градиент и температура нагревателя) и электрические (сопротивление и потребляемая мощность) характеристики металлокерамического нагревателя.

Увеличение интенсивности теплообмена приводит к снижению продольной составляющей максимального температурного градиента и увеличению электрического сопротивления и мощности. Замечено, что неограниченное увеличение интенсивности теплообмена может повлиять на надежность работы нагревательного элемента, так как из-за увеличения мощности нагревателя перепад температуры по его толщине может стать настолько существенным, что нельзя будет применять двумерную математическую модель и тогда полученные с ее помощью результаты могут оказаться неверными.

Кроме того, увеличение перпендикулярной составляющей градиента может привести к выходу нагревателя из строя.

Вычислительный эксперимент показал, что поведение максимального градиента, температуры МКНЭ, сопротивления и мощности при отклонении напряжения от номинального в условиях различной интенсивности теплообмена, а также изменения среднеинтегральной и максимальной температуры нагревателя, сопротивления, силы тока, электрической и тепловой мощности, времени переходного процесса при включении и отключении МКНЭ соответствуют ожидаемым и аналогичны наблюдаемым у других типов электронагревателей.

На градиент температуры МКНЭ большое влияние оказывают условия теплоотвода. Если с обеих поверхностей нагревательного элемента идет съем тепла, то составляющая градиента температуры вдоль пластины нагревателя монотонно увеличивается по мере выхода на стационарный режим и достигает максимума в установившемся режиме. Если же условия теплообмена на поверхностях нагревателя таковы, что одна поверхность МКНЭ нагревается, а другая - охлаждается, то градиент температуры вдоль поверхности нагревательного элемента имеет четко выраженный максимум до выхода на стационарный режим. Для составляющей градиента, перпендикулярной пластине нагревателя, такой картины не наблюдается, и она монотонно возрастает вплоть до выхода на стационарный режим.

Исследования динамики температурного градиента позволили сделать вывод, что при отводе теплоты от нагревательного элемента с обеих поверхностей наиболее

термонапряженное состояние, при котором может произойти отказ нагревателя, наблюдается в стационарном режиме, а если отвод теплоты происходит только с одной поверхности, то наиболее термонапряженное состояние наблюдается до выхода на стационарный режим.

Очень часто при разработке и проектировании прибора или устройства, составной частью которого является нагревательный блок на основе МКНЭ, возникает вопрос, возможно ли в данной конструкции, которая определяет режимные параметры - электрическое напряжение и интенсивность теплообмена на поверхности нагревателя, использовать нагревательные элементы определенного типоразмера, то есть, будет ли являться работа таких нагревателей в этой конструкции надежной. Неравенства (1)-(3) для конкретного нагревательного элемента задают в плоскости ( $\alpha$ ,  $U$ ) для конкретной температуры среды некоторую область, в которой при эксплуатации МКНЭ не будет происходить отказов. Эту область называют областью живучести конкретного нагревателя. Проведенные эксперименты с образцами МКНЭ показали, что величины градиента  $10$  К/мм и силы электрического тока по отношению к ширине дорожки  $2$  А/мм являются приемлемо допустимыми для большинства нагревательных элементов при их длительной эксплуатации. Для краткосрочной эксплуатации эти границы области жизни можно раздвинуть. По результатам расчетов характеристик МКНЭ при различных параметрах  $\alpha$  и  $U$  можно построить номограмму области живучести конкретного нагревательного элемента, на которой указать ограничительные кривые для нескольких допустимых значений градиента температуры, электрического тока и

температуры в местах крепления нагревателя. Имея такую номограмму для конкретного нагревателя, в результате анализа границ области живучести можно сделать вывод о допустимых значениях напряжения  $U$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , при которых возможна эксплуатация МКНЭ, а также определить предельно допустимые отклонения режимных параметров  $\alpha$  и  $U$  от номинальных.

Четвертая глава посвящена проектированию нагревательных элементов. В ней рассматривается существующая методика проектирования нагревателей и ставится задача теплофизического проектирования нагревательных элементов из условий их тепловой надежности: при заданных размерах нагревательного элемента и условиях теплообмена на его поверхности определить такие параметры размещения резистивного элемента в керамической пластине, при которых минимизируется функционал отклонения расчетной температуры нагревательного элемента от заданной  $\mathfrak{F}(T_p, T_3)$ . В работе в качестве функционала невязки было взято среднеквадратичное отклонение. Довольно часто в условии задачи проектирования вместо температуры задается мощность тепловыделения нагревателя. В этом случае необходимо определить заданную температуру из условия теплового баланса с учетом ограничений (3).

Для сокращения объема вычислений решение геометрической обратной задачи проектирования МКНЭ сведено к последовательному решению двух более простых задач - внутренней обратной задачи теплопроводности (в результате решения которой определяется удельная мощность источников

теплоты) и задачи определения параметров резистивного элемента по известной удельной мощности источников (которая является задачей дискретного программирования в силу технологических ограничений на ширину дорожек и зазор между ними).

Методику автоматизированного проектирования МКНЭ можно разбить на четыре этапа.

На первом этапе устанавливается объемное распределение удельной мощности источников теплоты при условии, что известны геометрические параметры нагревательного элемента, закон распределения температуры на поверхности нагревателя, теплопроводность его компонентов и характер взаимодействия окружающей среды.

Тело нагревательного элемента представляется в виде  $N$  подобластей (зон). На последующих этапах резистивный элемент будет размещаться регулярным образом в пределах каждой зоны. В результате решения внутренней обратной задачи теплопроводности определяются удельные мощности  $N$  источников теплоты в каждой зоне, которые минимизируют функционал  $\mathfrak{R}(T_p, T_3)$ . В конце первого этапа проводится проверка согласования заданного закона распределения температуры с расчетными значениями температуры, то есть проверка неравенства

$$\mathfrak{R}(T_p, T_3) \leq \Delta T_{\text{доп}}, \quad (7)$$

где  $\Delta T_{\text{доп}}$  - допустимое отклонение расчетной температуры от заданной.

В случае невыполнения условия согласования (7) тело нагревателя разбивается на большее число подобластей и повторяется процедура решения внутренней обратной задачи

ИВ В. В. Сидорова  
 АИ УРАЛ

теплопроводности. Если увеличение числа зон невозможно из-за технологических ограничений, то процедура проектирования МКНЭ прекращается и делается заключение о несоответствии конструкции нагревательного прибора технологическим требованиям.

На втором этапе для каждой подобласти определяются геометрические размеры и форма резистивных элементов, а также величины электрических сопротивлений по полученной на первом этапе удельной мощности внутренних источников теплоты. Резистивные элементы в пределах подобласти могут быть размещены на нескольких уровнях по толщине нагревательного элемента. Дорожки резистивного элемента в пределах подобласти на каждом уровне имеют свое регулярное размещение и одинаковые геометрические характеристики. Процесс компоновки резистивных элементов в теле пластины начинается с попытки размещения на одном уровне. При этом осуществляется перебор вариантов размещения, удовлетворяющих конструкторско-технологическим ограничениям и проверка неравенств (2) и (7). Если эти неравенства не выполняются, то делается попытка разместить резистивные элементы на большем количестве уровней.

Если для заданной мощности резистивный элемент не удастся разместить даже на максимально допустимом количестве уровней, то в случае невыполнения условия (7) необходимо увеличить число зон разбиения и возвратиться к первому этапу, а в случае невыполнения условия (2) делается вывод о том, что следует изменить параметры конструкции нагревательного прибора, поскольку заданные размеры МКНЭ и условия отвода

теплоты с его поверхностей не удовлетворяет техническим требованиям по общей электрической мощности.

Третий этап заключается в определении местоположения уровней размещения резистивных элементов, при котором минимизировалась бы составляющая градиента температуры, перпендикулярная пластине МКНЭ.

Четвертый этап заключается в моделировании различных ситуаций, связанных с неточностью технической реализации спроектированного элемента, и определении допустимых отклонений электрических и геометрических параметров резистивных элементов, при которых МКНЭ не выходит из строя.

Таким образом, методика проектирования МКНЭ включает в себя определение параметров теплового режима и выбор компоновки резистивных элементов в теле нагревательного элемента в рамках ограничений на конструкторско-технологические и электрические параметры, при которой получается заданное поле температуры.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы был разработан комплексный метод исследования тепловых процессов в МКНЭ и теплофизического проектирования нагревательных элементов. На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Для описания тепловых процессов, происходящих в МКНЭ, в большинстве случаев можно пользоваться двумерной математической моделью. При увеличении числа уровней размещения резистивного элемента увеличивается диапазон

режимных параметров, при которых возможно применение двумерной тепловой модели для исследования тепловых процессов и проектирования МКНЭ.

2. Внутренние источники теплоты в нагревательном элементе можно представлять равномерно распределенными в пределах каждой зоны регулярного расположения резистивного элемента. Для уточнения влияния неоднородности распределения источников на градиент температуры в нагревателе можно пользоваться поправкой (7).

3. Предложенная методика исследования тепловых режимов МКНЭ позволяет определить все основные тепловые и электрические параметры нагревателя как для установившегося рабочего режима, так и для процесса выхода на стационарный режим.

4. Разработанная методика определения интенсивности теплообмена на поверхности нагревательного элемента позволяет определить локальные коэффициенты теплоотдачи по результатам теплофизического эксперимента. Даны рекомендации по выбору количества и мест точек термометрирования для проведения такого эксперимента.

5. Предложены следующие пути снижения максимального градиента температур (т.е. повышению надежности) МКНЭ при равномерном расположении резистивного элемента в теле нагревателя: уменьшение ширины технологической зоны, увеличение интенсивности теплообмена на поверхности нагревательного элемента, минимизация отклонения напряжения от номинального в большую сторону.

6. Если конструкция прибора или устройства, в котором используется нагревательный элемент, такова, что теплоотвод осуществляется с обеих поверхностей нагревателя, то для определения экстремальных значений электрических и теплофизических характеристик МКНЭ достаточно рассматривать только стационарный режим и дополнительно определить величину электрического тока в момент включения. Если же с одной поверхности во время выхода на стационарный режим осуществляется подвод тепла к нагревателю, то для определения максимального значения температурного градиента необходимо рассматривать поведение характеристик нагревательного элемента и до выхода на стационарный режим.

7. Полученная номограмма области живучести МКНЭ, на которой наглядно в виде ограничительных кривых представлены все виды отказов нагревательных элементов, позволяет определить допустимые значения электрического напряжения и коэффициента теплоотдачи, при которых возможна эксплуатация конкретного нагревателя, а также определить предельно допустимые отклонения указанных параметров от номинальных. Такие номограммы можно использовать как паспортные данные нагревательных элементов.

8. С помощью неравномерного расположения резистивного элемента в теле нагревателя можно уменьшить максимальный градиент температуры до величины, минимальной для данной конструкции нагревательного прибора. С помощью предложенной методики проектирования МКНЭ можно определить геометрические параметры резистивного элемента с учетом ограничений на конструкторско-технологические и электрические.

параметры. Методика проектирования позволяет также определить все характеристики нагревательного элемента и провести моделирование возможных тепловых режимов.

9. Разработаны программный комплекс для определения основных технических характеристик МКНЭ, программный комплекс для определения интенсивности теплообмена на поверхности нагревательного элемента и САПР нагревательных элементов. Совместное использование этих комплексов позволяет спроектировать надежные с теплофизической точки зрения нагреватели.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ опубликовано в работах:

1. Костиков А.О., Мацевитый Ю.М., Овчаренко В.Е., Цаканян О.С. Теплофизическое проектирование металлокерамических нагревательных приборов // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: Научн.-техн. сб. - 1993. - Вып.2. - С. 54-60.

2. Костиков А.О., Мацевитый Ю.М., Овчаренко В.Е., Цаканян О.С. Методика проектирования металлокерамических нагревательных элементов // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры: Научн.-техн. сб. - 1993. - Вып.3-4. - С. 18-25.

3. A.O. Kostikov, O.S. Tsakanyan. Designing cermet heating elements on condition of their thermal reliability. // 1. Mathmod Vienna. Proceeding of the IMACS Symposium on MATHEMATICAL MODELING during February 2-4, 1994 at Technical University Vienna, Austria. 1994 Volume 4. - P. 731-734.

4. Kostikov A., Tsakanyan O. Determining the conditions of reliable operation of cermet heating elements by means of simulation // Eurosime Congress '95. Poster Book. ARGESIM Report No. 3. Printed by CA Druckerei, Vienna, Austria, 1995. - P. 20.

### SUMMARY

Kostikov A.O. Thermal processes in the cermet heating elements and scientific basis of their designing. Thesis is a manuscript for finding of academic degree of a candidate of sciences on the speciality 05.14.05 - theoretical thermal engineering, Institute for Problems in Machinery of National Academy of Sciences of the Ukraine, Kharkov, 1996.

Research problems of heat state of cermet heating elements (CHEs) have been considered. The methodology of determination of thermal and electrical performances of CHEs, the methodology of determination of intensity of heat transfer on heater surfaces and the methodology of their designing have been suggested. The results of investigations of dependence of main technical characteristics from regime parameters have been obtained.

### АНОТАЦІЯ

Костіков А.О. Теплові процеси в металокерамічних нагрівальних елементах та наукові основи їх проектування. Дисертація є рукопис, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.05 - теоретична теплотехніка, Інститут проблем машинобудування НАН України, Харків, 1996.

1115860

## Розглянуті питання

металокерамічних нагрівальних елементів (МКНЭ). Запропоновані методика знаходження теплових та електричних параметрів МКНЭ, методика визначення інтенсивності теплообміну на поверхнях нагрівачів і методика їх проектування. Наведені результати дослідження залежності основних технічних характеристик нагрівальних елементів від режимних параметрів.

Ключевые слова: моделирование, идентификация, проектирование, теплообмен, температура, металлокерамический нагревательный элемент, резистивный элемент.

Ответственный за выпуск: к.т.н. Лушпенко С.Ф.

Подписано к печати 08.04.96 Формат 60 x 90 1/16. Бумага тип. №1. Услов. печ. л. 1,0. Уч. — изд. л. 0,96. Тираж 100 экз. Заказ *43*

---

Ротапринт ИГМаш НАН Украины

310046, Харьков — 46, ул. Дм. Пожарского, 2/10