

Автореф.  
К. 60

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Колесников Борис Петрович

УДК 536.21(088.8)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1985

Работа выполнена на кафедре теплотехники в Краснодарском  
ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент

Г.М.Серых

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

В.З.Геллер;

кандидат технических наук, доцент

В.В.Новиков


Ведущее предприятие - Институт теплофизики Сибирского  
отделения АН СССР

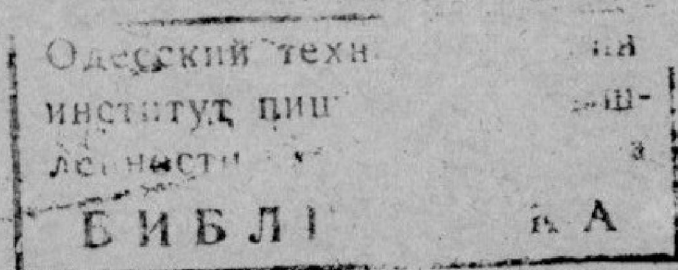
Защита состоится "22" ноября 1985 г. в <sup>30</sup>10 часов  
на заседании специализированного совета К 068.35.04 в Одесском  
технологическом институте пищевой промышленности им.М.В.Ломоно-  
сова (270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломо-  
носова.

Автореферат разослан "22" октября 1985 г.

Ученый секретарь специализированного  
совета к.т.н., доцент

  
Г.И.Элькин



ОНАХТ 13.11.12  
Разработка методов и



v015137

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Гетерогенные материалы (ГМ) (строительные, зернистые, теплозащитные, металло- и минералокерамика, наполненные полимеры и другие механические смеси) находят широкое применение в различных отраслях науки и техники. Знание теплофизических свойств ГМ позволяет более точно определять конструкционные и другие характеристики получаемых из них изделий, а своевременный контроль теплофизических свойств способствует повышению их качества при изготовлении и надежности при эксплуатации. Требование сохранения целостности ответственных изделий и конструкций приводит к необходимости проведения контроля неразрушающим способом. Надежность определения теплофизических характеристик (ТФХ) зерна и других гетерогенных пищевых продуктов способствует оптимальному решению вопросов их хранения и переработки, что является одним из важнейших звеньев выполнения Продовольственной программы.

Использование известных и внедрение новых ГМ, как подчеркивается в "Решении УП Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ" (Ташкент, 1982 г.), выдвигает ряд важнейших задач, среди которых значительное место занимают разработки методов прогнозирования и неразрушающего контроля ТФХ. Анализ существующих методов и устройств для неразрушающего теплофизического контроля неоднородных материалов привел к выводу о необходимости дальнейшей разработки новых методов и средств теплофизических исследований и обоснования их применения. С этой проблемой неразрывно связана задача выбора оптимальных размеров образцов (представительного элемента) ГМ при теплофизических исследованиях, решение которой в свою очередь

к. 015137

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. Б. Ломоносова

Б И Б Л И О Т Е К А

Пересчет 1984

может быть получено с помощью аналитических методов определения ТФХ ГМ. Часто эффективную теплопроводность ГМ вычисляют, исходя из модельных представлений об их структуре, что приводит к необходимости упрощения реальных структур. Методы корректного расчета эффективного коэффициента температуропроводности ГМ практически относятся только к многослойным композиционным материалам. В связи с этим исследования по выявлению влияния вариаций структурных характеристик на ТФХ ГМ и разработка методов их прогнозирования перспективны и имеют самостоятельное значение.

Поставленные в данной работе задачи решались в соответствии с координационным планом АН СССР на 10-ю и 11-ю пятилетки по комплексной программе "Теплофизика".

Цель работы - комплексная разработка аналитических и экспериментальных методов и устройств для неразрушающего определения и контроля ТФХ ГМ. Достижение этой цели потребовало последовательного решения следующих задач:

1. Разработка аналитических методов определения обобщенной проводимости (на примере теплопроводности) и температуропроводности ГМ, учитывающих реальные особенности их структуры.
2. Оценка оптимальных размеров образцов ГМ при теплофизических исследованиях.
3. Разработка экспериментального метода неразрушающего определения и контроля (НОК) комплекса ТФХ (коэффициентов тепло- и температуропроводности) твердых неметаллических материалов и обоснования его применения для исследования ГМ.
4. Создание на базе разработанного метода установки для определения и контроля ТФХ изделий и образцов из твердых и сыпучих ГМ неразрушающим и традиционным - разрушающим способами.

Научная новизна. Впервые получена корреляция критического сечения ГМ с геометрической характеристикой структуры – смежностью, с помощью которой разработан аналитический метод определения эффективной проводимости ГМ в широком диапазоне изменений концентраций и соотношений проводимостей компонентов, учитывающий реальные особенности структур ГМ при привлечении приемов стереологического анализа. Усовершенствована методика выбора размеров образцов ГМ для корректного определения ТФХ. Впервые получено решение одной задачи теплопроводности, на базе которого разработаны и защищены авторскими свидетельствами экспериментальный метод НОК ТФХ гетерогенных материалов, а также реализующие его термозонды.

Апробация работы. Результаты исследования доложены на: УІ Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ, 1978 г., Минск; У и УІІ Всесоюзных теплофизических школах, 1979 г., Краснодар и 1983 г., Киев; научно-технических семинарах "Современное состояние теплофизического приборостроения", 1980 г., 1981 г., Киев; УІІ Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ, 1982 г., Ташкент; научной сессии, посвященной пятидесятилетию КПИ, 1980 г., Краснодар; научно-технических конференциях молодых ученых КПИ – 1980 г., 1981 г., 1983 г., Краснодар; научно-технической конференции "Резистивная элементная база электроизмерительных приборов, первичные преобразователи и приборы на их основе", 1983 г., Краснодар; заседании секции "Теплофизические и массообменные свойства веществ" научного совета по проблеме "Массо- и теплоперенос в технологических процессах" ГКНТ СМ СССР, 1984 г., Киев.

Практическую ценность представляют разработанные: аналитический метод и полученные расчетные зависимости для оценки

и прогнозирования эффективной проводимости ГМ; экспериментальный метод и установка, обеспечивающие неразрушающий контроль качества готовых изделий из неметаллических материалов и экспрессное определение комплекса ТФХ твердых гетерогенных и сыпучих материалов в лабораторных и полевых условиях; рекомендации по выбору оптимальных размеров образцов ГМ при теплофизических исследованиях и условия корректного применения экспериментальных методов для исследования ТФХ гетерогенных материалов; способ учета экранирующего эффекта термического сопротивления контакта зернистого слоя с граничной плитой, позволяющий более корректно сопоставлять экспериментальные и теоретические (расчетные) значения проводимостей зернистых ГМ.

Результаты работ используются в Кубанском филиале ВНИИЗерно для исследования ТФХ различных круп, в "Ожгипронсельстрой" для исследования свойств керамзитобетонов с комплексными химическими добавками (экономический эффект 32 тыс. руб.) и на ряде других предприятий, где экономический эффект от внедрения трех модификаций установки составил 240 тыс. руб.

Автор защищает:

1. Аналитический метод определения эффективной проводимости ГМ во всем диапазоне изменений концентраций ( $0 < v_2 < 1$ ) и соотношений проводимостей ( $0 < v_2 < 1$ ) компонентов, учитывающий реальные особенности их структур.

2. Методику выбора оптимальных размеров образцов ГМ при теплофизических исследованиях.

3. Новый экспериментальный метод неразрушающего определения и контроля ТФХ твердых материалов и условия его применения к исследованию ГМ.

4. Новые конструкции термозондов.

5. Результаты экспериментального и аналитического определения ТФХ гетерогенных материалов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ и получено 4 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы 293 с., в том числе 131 с. основного машинописного текста, 9 таблиц, 72 рисунков, 232 библиографических ссылки, 8 приложений на 61 страницах.

Условные обозначения.  $v_i$  и  $\lambda_i$  - концентрация и коэффициент проводимости (теплопроводности)  $i$ -го компонента;  
 $v_1 = \lambda_2/\lambda_1$  и  $v_2 = \lambda_1/\lambda_2$ ;  $L_{ei} = \lambda_e/\lambda_i$ ;  $L_{oi} = \lambda_{eo}/\lambda_i$ ;  
 $L_{\infty i} = \lambda_{e\infty}/\lambda_i$ ;  $C_i$  - степень контакта (смежность);  $S_{11}$  и  $S_{12}$  - удельные контактные поверхности соответственно компонентов I-1 и I-2;  $\alpha_c$  - критическое сечение ГМ;  $N_K$  - координационное число;  $N_K^*$  - критическое число контактов, характеризующее нижнюю границу существования бесконечного кластера (БК);  
 $n_0$  и  $n_{\infty}$  - коэффициенты анизодиаметричности (формы) соответственно при  $\lambda_1 > \lambda_2$  и  $\lambda_2 > \lambda_1$  ( $n_0 \geq 1$ ,  $0 \leq n_{\infty} < 1$ , для изометрических частиц -  $n_0 = n_{\infty} = 1$ );  $K_{BK_i} = v_{BK_i}/v_i$ ;  
 $K_{BK_i}^a = v_{BK_i}^a/v_i$ ;  $v_{BK_i}$  и  $v_{BK_i}^a$  - объемные доли соответственно БК и его активной (участвующей в переносе) части;  
 $v_c$  - порог протекания;  $v_0$  - плотность свободной засыпки;  
 $x^*$ ,  $x$  - значения эффективного свойства ГМ, рассчитанные при концентрациях  $v_{iN}$  и  $v_i$ ;  $\omega = r/R$  - безразмерная радиальная координата;  $\lambda_3$ ,  $a_3$  - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности эталона;  $\theta = \lambda/\sqrt{a}$  - тепловая активность;  $F_0(\tau_i) = \frac{a\tau_i}{R^2}$ ;  $ierfc y$  - интеграл функции ошибок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы и сформулирована цель работы.

В первой главе рассмотрены аналитические методы определения эффективных коэффициентов проводимости (теплопроводности)  $\lambda_e$  и температуропроводности  $\alpha_e$  твердых и зернистых ГМ.

В настоящее время, благодаря работам В.И.Оделевского, Г.Н. Дульнева, Л.Л.Васильева, В.А.Осиповой, Х.А.Кяара, В.В.Скорохода, Ю.П.Заричняка, Д.И.Демидченко, В.В.Новикова, Д.Н.Волкова и других, разработано большое число зависимостей хорошо описывающих проводимость ряда типов ГМ. Большинство из них основано на модельных представлениях о структуре ГМ, что приводит к необходимости упрощения реальных структур, а следовательно к некоторому искажению физических процессов, происходящих в ГМ. Все это в конечном счете влияет на результаты расчетов  $\lambda_e$ .

Отмечено, что в работах, посвященных проблеме прогнозирования  $\alpha_e$ , основное внимание направлено на определение условий корректного использования для расчета  $\alpha_e$  многослойных материалов модели квазиоднородного тела. Показано, что задача выбора оптимальных размеров образцов при теплофизических исследованиях ГМ с неорганизованной структурой мало разработана.

Анализ известных методов и устройств для НОК комплекса ТФХ, в разработке которых большой вклад внесли В.В.Власов, Ю.С.Шаталов, Г.М.Серых, С.З.Сапожников, С.П.Фомин, Е.С.Платунов, В.В.Курепин и другие, показал, что они мало пригодны для исследования ГМ вследствие использования локально измеряемых температур (нет осреднения свойств по поверхности материала) и неопределенности выбора размеров исследуемых образцов для

нахождения осредненных по объему ТФХ.

В соответствии с критическим анализом поставлены указанные выше задачи и намечены наиболее перспективные пути их решения.

Вторая глава посвящена разработке аналитического метода определения эффективной проводимости ГМ.

Рассмотрена двухкомпонентная твердая изотропная гетерогенная система (ГС) (рис.1). Принималось, что тепло, передаваемое конвекцией и излучением, пренебрежительно мало, проводимости компонентов известны и постоянны, а контактные термические сопротивления отсутствуют.

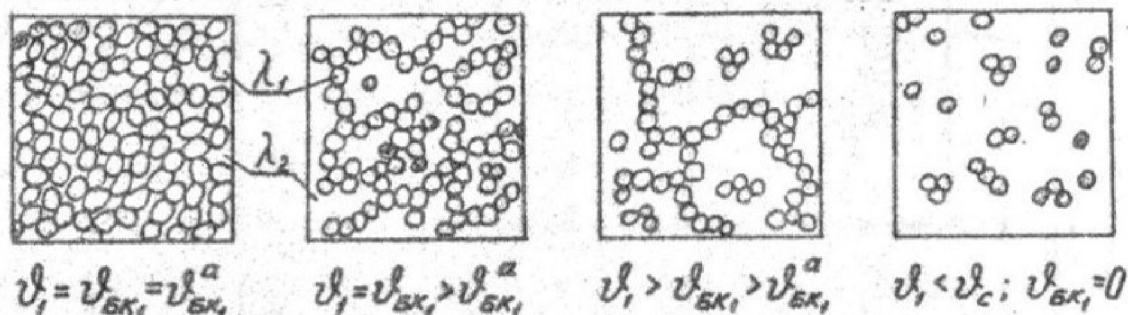
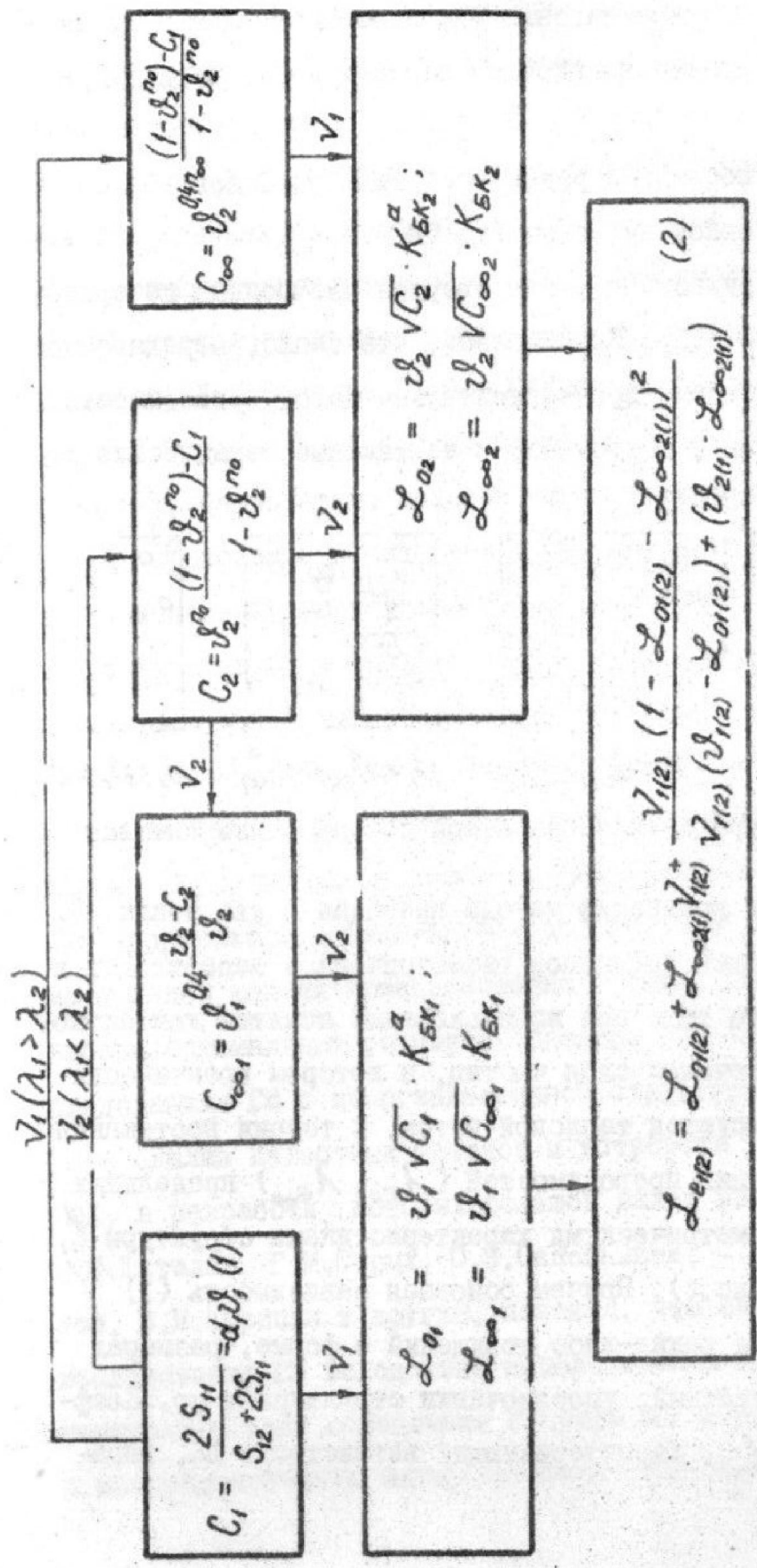


Рис.1. Структура двухкомпонентной гетерогенной системы

Вывод основных уравнений метода проведен в два этапа. На первом этапе с помощью принципов геометрической вероятности и статистики пористого тела при использовании понятия контактного (критического) сечения слоя частиц, в котором практически полностью концентрируется тепловой поток, и теории протекания установлена корреляция проводимостей ( $\lambda_{e0}, \lambda_{e\infty}$ ) предельных ГС (с  $\nu_c = 0$ ) с геометрическими характеристиками структуры  $S_1, N_k, n_0$  и  $n_{\infty}$  (рис.2). Причем основная зависимость (1) (рис.2) получена без каких-либо допущений о форме, размерах частиц и их распределений, упорядочении структуры и др. Коэффициент  $0 \leq K_{BK_1}^a \leq 1$ , характеризующий ветвистость БК, выра-



$K_{EK1} = A_1 (N_K - N_K^K)^{\beta}$  или  $K_{EK1} = A_2 (-\nu_1 - \nu_c)^{\beta}$ ;  $K_{EK1}^a = A_1' (N_K - N_K^K)^{\beta}$  или  $K_{EK1}^a = A_2' (\nu_1 - \nu_c)^{\beta}$ ;  
 $A_1 = 0.55 \pm 0.03$ ;  $A_2 = 1.7 \pm 0.1$ ;  $A_1' = 0.37 \pm 0.02$ ;  $A_2' = 1.5 \pm 0.1$ ;  $\beta = 0.6 \pm 0.05$ ;  
 $\beta = 0.35 \pm 0.05$ ;  $N_K^K = 1.5 \pm 0.1$ .

Рис. 2. Схема расчета эффективной проводимости гетерогенных систем

жен через координационные числа  $N_K$  и  $N_K^*$ , что позволяет корректнее учитывать топологию реальных ГС. В связи с тем, что  $V_i = 0$ , каждая ГС условно рассматривалась как состоящая из двух предельных систем (ПС), в которых процесс переноса осуществляется по первому (ПС-1) и второму (ПС-2) компонентам. Так, значению  $V_{\lambda_1} = 0$  соответствуют ПС-1 с  $\lambda_2 = 0$  ( $L_{01}$ ) и ПС-2 с  $\lambda_1 = \infty$  ( $L_{\infty 2}$ ), а  $V_{\lambda_2} = 0$  - ПС-1 с  $\lambda_1 = 0$  ( $L_{02}$ ) и ПС-2 с  $\lambda_2 = \infty$  ( $L_{\infty 1}$ ).

На втором этапе, с учетом, что  $L_{01}$ ,  $L_{\infty 2}$  и  $L_{02}$ ,  $L_{\infty 1}$  определяют значения  $\lambda_e(V_i)$  на границе области изменения  $V_i = 0$  и  $V_i = 1$ , а также ряда свойств монотонно-возрастающей функции  $\lambda_e(V_i)$  при  $V_i = 1$ , найдена четырехпараметрическая аппроксимационная формула для расчета эффективной проводимости ГС в диапазоне  $0 \leq V_i \leq 1$  (рис.2, формула (2)).

Полученная зависимость физически устойчива и удовлетворяет предельным переходам. Она показывает, что  $\lambda_e$  является функцией не только концентрации, но и ряда других важных параметров, характеризующих связанность, топологию и форму элементов структуры. Показано, что применение методов стереологического анализа для определения указанных структурных характеристик позволяет учесть реальные особенности структур твердых ГМ, а следовательно, более точно рассчитать соответствующие им значения  $\lambda_e$ . Так, смежность  $S_v$ , которая является комплексной характеристикой структуры, определяется простым подсчетом на случайном сечении (шлифе) без изменений и допущений о форме, размерах и распределении частиц. В ряде случаев такой подход к определению  $\lambda_e$  можно рассматривать как неразрушающий.

Показана возможность учета контактных термических сопротивлений, расчета многокомпонентных ГС и использование несте-

реологических методов для определения структурных характеристик. В случае отсутствия точных данных о последних возможно использование вероятностно-статистических соотношений, характеризующих их изменение в зависимости от концентрации. Так, для ГС с равноправными (в статистическом смысле) компонентами характерна зависимость  $C_i = \nu_i^2$  и значение  $\nu_c = 0,15$ , а для связанных ГС типа пористых металлов -  $C_i = \nu_i (\nu_i - \nu_0) / (1 - \nu_0)$ . Такие соотношения позволяют наглядно проследить характер изменения топологии и проводимости ГС в диапазоне  $0 \leq \nu_i \leq 1$ .

Метод применим для расчета проводимостей ГС многих типов - с изолированными включениями различной формы, взаимопроникающими компонентами, промежуточной структуры типа керметов, для связанных и зернистых материалов. При исследовании пористых и зернистых ГМ в некоторых случаях целесообразно использовать его совместно с учитывающими конвективную и лучистую составляющие известными методиками.

Третья глава посвящена проблеме выбора оптимальных размеров образцов ГМ при теплофизических исследованиях. Оценка размеров представительного элемента ( $\Pi Э_x$ ) сводится к нахождению минимальных размеров образца, исследование которого дает нормированно-корректные результаты при определении некоторого эффективного свойства  $X$ . Размеры могут задаваться количеством частиц  $N$ , находящихся в объеме образца, и соотношением их характерных размеров  $d$  с размерами  $\Pi Э_x$ . Выбор  $\Pi Э_x$ , к которому можно отнести с заданной погрешностью  $\delta_x$  рассчитанное значение  $X$ , связан с вероятностью попадания в рассматриваемый объем ровно  $N$  частиц, которая позволяет определить возможное отклонение концентраций  $\nu_{i,N}$  образца конечных размеров с числом частиц  $N$  от концентрации  $\nu_i$  всей системы в целом

( $N \rightarrow \infty$ ). Тогда для предварительной оценки размеров ПЭ, удовлетворяющей практику теплофизических исследований, достаточно с помощью аналитической зависимости  $x = f(\mathcal{V}_i, \mathcal{V}_i)$  найти погрешность  $\delta_x = |(x^* - x)/x|$ .

С помощью формулы (2) оценены размеры представительного элемента по теплопроводности (ПЭ) различных типов ГМ. Установлено, что при исследовании  $\lambda_e$  ГМ типа керметов наибольшее число частиц с большей проводимостью необходимо ввести в рассмотрение в районе  $\mathcal{V}_c$  (рис.3); при  $\mathcal{V}_i \leq 10^{-2}$  требование к представительности слабо возрастает; менее требовательны к представительности ГС с изолированными включениями (штриховая линия на рис.3).

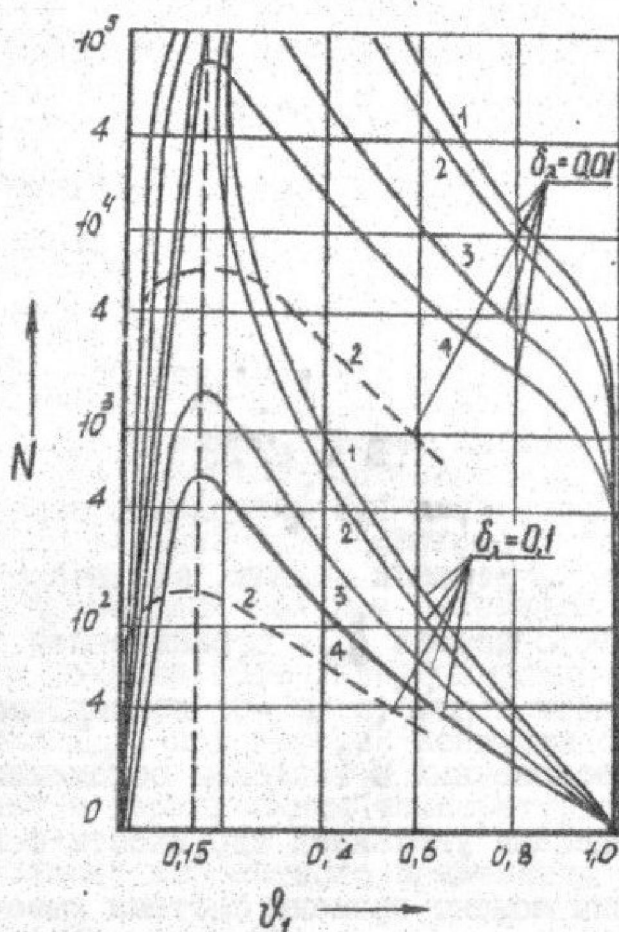


Рис.3. Зависимость размеров представительного элемента ГС с равноправными компонентами ( $C_i = \mathcal{V}_i^2$ ,  $\mathcal{V}_c = 0,15$ ) от концентрации:  
 1 -  $\mathcal{V}_i = 0$ ; 2 -  $\mathcal{V}_i = 0,001$ ; 3 -  $\mathcal{V}_i = 0,05$ ;  
 4 -  $\mathcal{V}_i = 0,1$ .

Показано, что величина

$$L_e = \left( \frac{N_2}{\delta_i} \right)^{1/3} d = n_e d \quad (3)$$

имеет смысл, подобный значению радиуса корреляции в теории протекания. Установлено, что образец ГМ для определения  $\lambda_e$  с погрешностью, не превышающей  $\delta_2$ , должен иметь форму трехмерной фигуры (сферы, куба, диска и т.п.) с наименьшим линейным размером  $L_{e2}$ , который удовлетворяет условию

$$L_{e2} \geq n_e d. \quad (4)$$

Подобные зависимости получены и для эффективной температуропроводности, исследование которой из-за сложности нестационарного теплопереноса в ГМ, в первом приближении производилось с помощью модели ГС Ю.П.Заричняка и В.В.Новикова [8].

Введено понятие обобщенного ПЭ (ОПЭ), который тождествен максимальному из  $\text{ПЭ}_x$ , взятому по каждому из  $K$  свойств в отдельности. Так, при комплексном определении ТФХ с погрешностью, не превышающей заданную для большинства реальных ГМ,  $\text{ОПЭ} \equiv \text{ПЭ}_2$ .

В четвертой главе изложены теоретические предпосылки экспериментального метода определения ТФХ материалов неразрушающим способом. Метод основан на решении задачи, заключающейся в подводе постоянного теплового потока  $q_0$  к ограниченной окружностью радиусом  $R$  части плоскости контакта ( $z=0$ ) исследуемого и эталонного образцов, полубесконечных в тепловом отношении. При этом считалось: за пределами указанной окружности теплообмен отсутствует; в начальный момент времени система имеет температуру  $T_0$ ; коэффициенты тепло- и температуропроводности постоянны. В такой постановке задача решена впервые.

При рассмотрении обратной задачи нахождения коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  использованы решения для температур в центре зоны разогрева  $T(0,0,\tau)$  и среднеинтегральной температуры контакта

зоны разогрева  $\Delta \bar{T} = \int_0^1 \Delta T(\omega, 0, \tau) d\omega$ . Ввиду сложности точные решения заменены на одно приближенное с последующим вводом корректирующих эту замену поправок

$$\Delta T(\tau) = T(0, 0, \tau) - T_0 = \frac{2q_0 \sqrt{\tau}}{(b_3 + b)} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{b_3 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} + b \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}}{b_3 + b} \right] \quad (5)$$

Уравнение (5) позволило найти решение обратной задачи (рис. 4) при разделении процесса теплопроводности на два периода, соответствующих времени измерения температуры в плоскости контакта  $\tau_1$  и  $\tau_2$  ( $\tau_2 \gg \tau_1$ ).

Получен критерий оценки режима опыта, удовлетворяющий условию минимальной погрешности определения  $\alpha$ , с помощью которого установлены оптимальные диапазоны  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

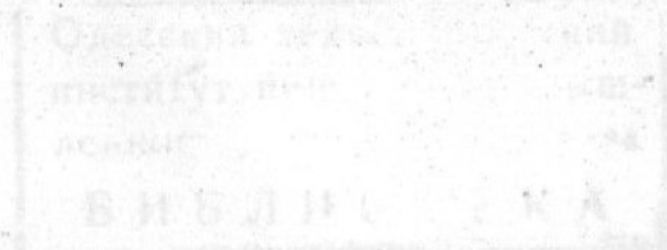
$$0,025 \leq F_0(\tau_1) \leq 0,1 \quad \text{и} \quad 0,25 \leq F_0(\tau_2) \leq 1 \quad (6)$$

и требования по выбору материала эталона. Исследованы вопросы адекватности гомогенных образцов математической модели эксперимента. Построены графики, позволяющие оценить толщину ( $z_{opt}$ ) и протяженность ( $r_{opt}$ ) однородных образцов и эталонов для корректного определения ТФХ при выбранном режиме опыта.

Используя понятие эффективной глубины проникновения температурного поля  $L_e$ , под которой понимали слой материала, активно участвующий в формировании температурного поля контакта, определено условие корректного применения разработанного метода НОК для исследования ГМ

$$L_e \geq L_e \quad (L_e < z_{opt}, \quad L_e < r_{opt}). \quad (7)$$

При этом ошибка в определении  $\alpha_e$  при изменении граничных условий на расстоянии  $L_e$  от зоны контакта нормировалась равной 10 % при заданном режиме эксперимента.



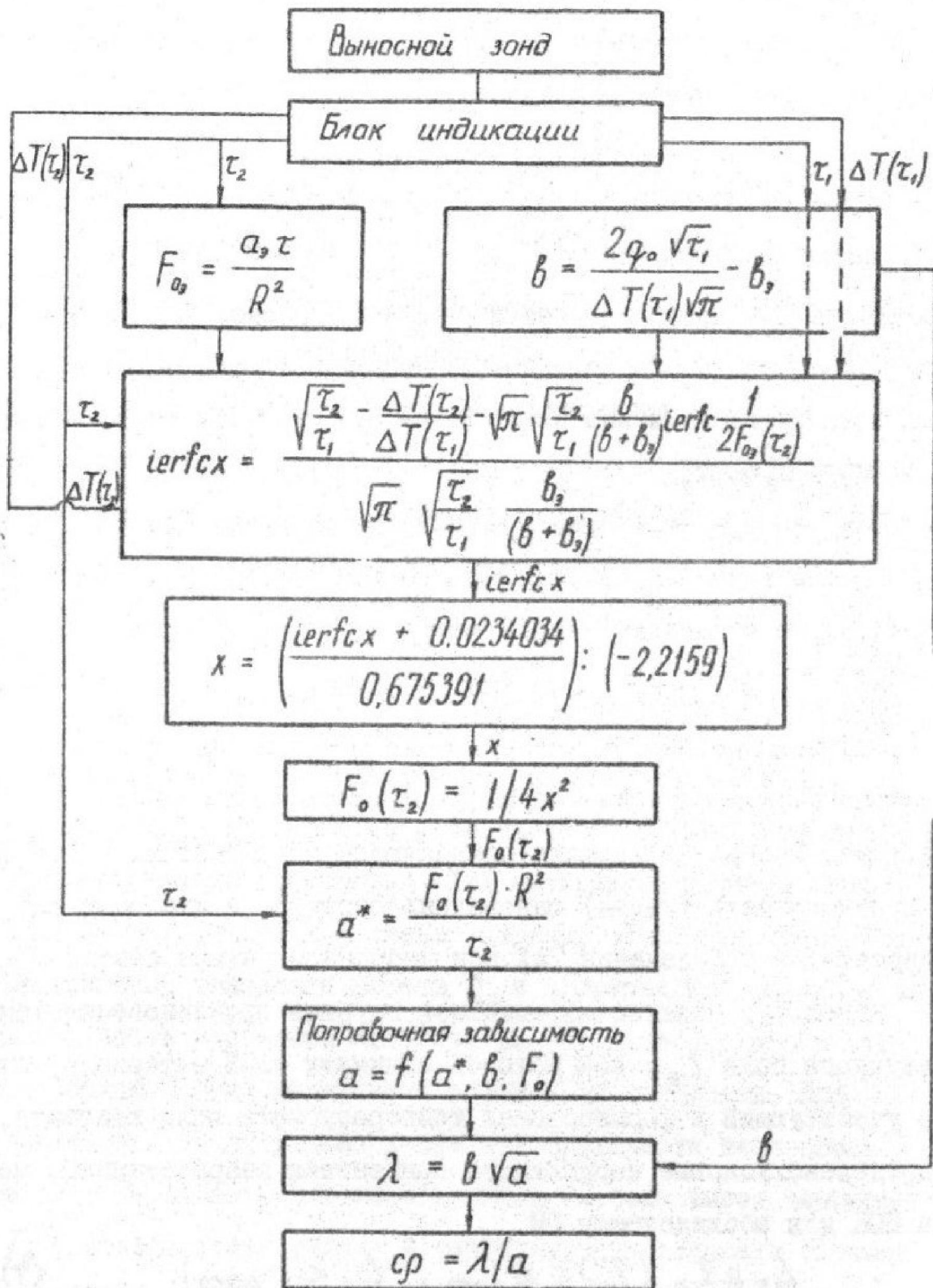


Рис. 4. Схема решения обратной задачи

В пятой главе описана установка для комплексного определения и контроля ТФХ ГМ. Установка состоит из базового измерительного блока, серии термозондов, устройства обеспечивающего контакт выносного неразрушающего термозонда с поверхностью образца или изделия и служит для исследования материалов с

$$\lambda = (0,03 \pm 1,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \text{ и } a = (0,8 \pm 10) 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Разработаны два основных варианта выносных термозондов (рис.5), реализующих физическую модель метода. Оба варианта

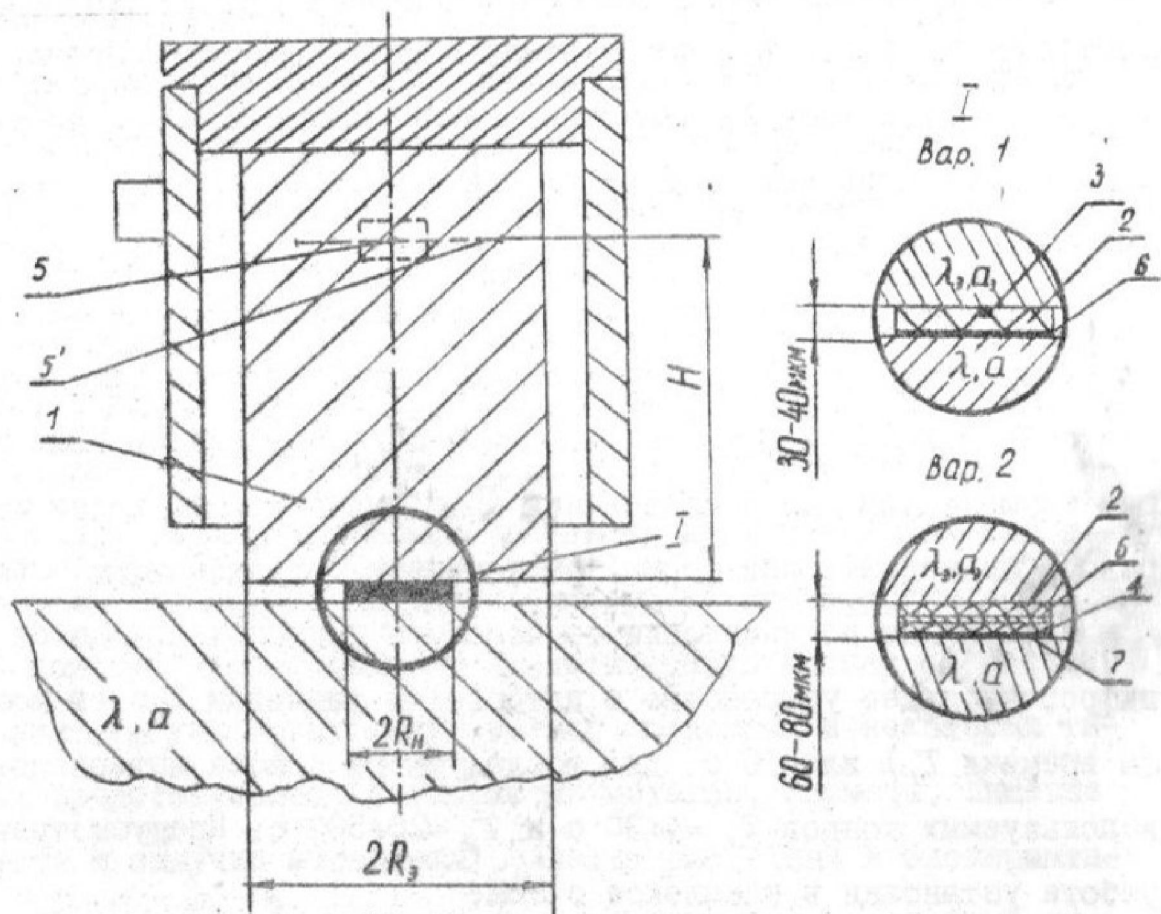


Рис.5. Схема выносных термозондов: I - эталон, 2 - нагреватель, 3 - термопара, 4 - термометр сопротивления, 5 - пассивный термостат, 5' - контрольный термометр сопротивления, 6 - подложка, 7 - слой фторопластовой эмульсии

Одесский техн. институт при  
Львовск. ун-те  
БИБЛИОТЕКА

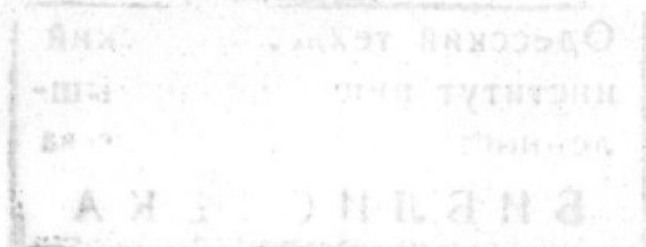
№ 15137

содержат эталон I, на нижнем торце которого, соосно с ним, установлен плоский нагреватель 2 и термоприемник 4. Материал эталона — полиметилметакрилат, пенопласты, кварцевое стекло и другие материалы с известными ТФХ. Условие полуограниченности эталона практически обеспечено тем, что  $R_2 = H = 5R_H$ .

В локальном зонде (ЛЗ) (рис.5 вар.1) термоприемник — хромель-капелевая термopара 3, установленная в центре нагревателя. Холодные концы ее введены в пассивный термостат 5. В среднеинтегральном зонде (СИЗ) (вар.2), в котором термоприемником служит термометр сопротивления 4, впервые применено устройство [3], состоящее из фольговых нагревателя 2 и термометра сопротивления 4 одного и того же диаметра, наклеенных соосно на противоположные стороны полиимидной пленки 6. Применение планарной технологии позволило изготовить "сетчатую" структуру нагревателя и термометра сопротивления двух разновидностей — с монотонно уменьшающейся шириной спирали при одинаковом ее шаге и с постоянной шириной при уменьшающемся шаге. Приведены конструкции термозондов для исследования проб сыпучих материалов и образцов цилиндрической формы традиционным — разрушающим способом.

Информация об изменении температуры контакта выводится на цифropечатающее устройство с интервалом фиксации 2 с (в моменты времени  $\tau_1$ ) или 10 с. Для исследуемого класса материалов и используемых зондов  $\tau_1 = 4+30$  с и  $\tau_2 = 20+500$  с. Предусмотрена работа установки в комплексе с ЭВМ.

Для повышения производительности возможно одновременное подключение 5 зондов либо использование разработанного малоинерционного выносного термозонда [14]. Оценены погрешности, связанные с теплообменом в плоскости контакта при  $r > R$ . Разработан способ учета по данным эксперимента суммарной погрешно-



сти, возникающей за счет термического сопротивления контакта, собственной теплоемкости нагревателя и инерционности термоприемника. Способ основан на использовании закономерности изменения температуры контакта в начальной стадии теплового процесса.

Проведена калибровка установки и метрологическая оценка погрешности определения и контроля ТФХ. Для режима неразрушающего определения погрешность составляет для  $\alpha$  - 12-15 %, для  $\lambda$  - 8-10 %; в режиме контроля соответственно 7-12 % и 4-7 %. Теоретические оценки погрешности НОК подтверждены результатами испытаний установки.

В шестой главе приведен анализ результатов сопоставления экспериментальных и расчетных значений ТФХ ГМ. Проведены экспериментальные исследования искусственно созданных образцов ГМ (композиции на основе эпоксидной смолы с металлическими включениями различной формы, прессовки металлических частиц с полимерными порошками, образцы пористого полистирола) и типичных представителей ГМ (различные виды круп, пищевые продукты, бетон и т.п.). Показана целесообразность применения СИЗ для исследования ТФХ средне- и крупнодисперсных неоднородных ГМ.

С помощью разработанного аналитического метода определены значения  $\lambda_e$  указанных искусственно созданных и некоторых типичных представителей ГМ (пористые металлы, керметы, пищевые продукты и сыпучие материалы). Анализ расчетных и экспериментальных значений  $\lambda_e$  показал, что расхождения между ними лежат в пределах погрешности измерений свойств материалов и исходной информации о структуре, причем лучшее совпадение дают расчеты, использующие результаты стереологического анализа.

Предложен способ учета экранирующего эффекта термического сопротивления контакта зернистого слоя с граничной плитой,

позволяющий более корректно сопоставлять экспериментальные и расчетные значения  $\lambda_e$ , что дает возможность существенно сузить ширину зоны предсказуемых значений  $\lambda_e$  зернистых материалов с  $V_i \rightarrow 0$ .

Экспериментально подтверждено, что использование рассчитанных по разработанной методике значений  $\lambda_e$  для аналитического определения  $\alpha_e$  по модели квазиоднородного тела позволяет достаточно надежно прогнозировать комплекс ТФХ образцов ГМ, для которых выполняется условие представительности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод и получены зависимости для аналитического определения эффективной проводимости гетерогенных материалов (ГМ), представляющих собой механические смеси, во всем диапазоне изменений концентраций ( $0 \leq v_i \leq 1$ ) и соотношений проводимостей ( $0 \leq \nu_i \leq 1$ ) компонентов. Метод учитывает реальную структуру исследуемых ГМ вследствие использования при его разработке впервые полученной корреляции критического сечения ГМ со смежностью (степенью контакта структурных элементов) и координационного числа для оценки связанности (топологии) структуры. Предложено использовать в ряде случаев методы стереологического анализа для нахождения основных геометрических характеристик структуры реальных твердых ГМ (смежность, координационное число, коэффициент формы), входящих в расчетные формулы метода.

2. Усовершенствована методика выбора оптимальных размеров образцов ГМ при теплофизических исследованиях. Установлено, что для корректного определения теплофизических характеристик (ТФХ) ГМ на образцах конечных размеров минимальный линейный размер исследуемого трехмерного образца должен быть не меньше

характерного размера представительного элемента, который зависит от свойств, концентрации, размеров структурных элементов компонентов и характера структуры, а также от заданной степени соответствия ТФХ образца ТФХ гетерогенной системы, рассматриваемую как генеральную совокупность. Показано, что наиболее требовательны к представительности ГМ с промежуточной структурой типа керметов, причем при исследовании таких ГМ наибольшее число частиц с большей проводимостью необходимо ввести в рассмотрение при их концентрации, находящейся в районе порога протекания.

3. Впервые получено решение задачи нестационарной теплопроводности, заключающейся в подводе постоянного теплового потока к ограниченной окружностью части плоскости контакта двух полуограниченных тел. На базе этого решения разработан новый экспериментальный относительный метод неразрушающего определения ТФХ материалов, предполагающий измерение приращения локальной (в центре зоны разогрева) либо среднеинтегральной температуры контакта зоны разогрева в зависимости от времени. Оценена адекватность математической модели метода тепловому процессу эксперимента и определены его оптимальные режимы. С помощью разработанных положений о представительном элементе установлены условия корректного применения метода для исследования ГМ.

4. Создана установка для неразрушающего исследования комплекса ТФХ материалов с  $\lambda = (0,035 \pm 1,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и  $D = (0,08 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Разработаны несколько вариантов термозондов, в том числе среднеинтегральных, в которых впервые использованы малоинерционные фольговые термопреобразователи, позволяющие в ходе опыта создавать одновременно равномерное распределение теплового потока и производить измерение среднеинтегральной температуры в зоне разогрева контакта эталона

термозонда с поверхностью исследуемого материала.

5. Разработана методика учета по данным эксперимента суммарной погрешности, возникающей за счет термического сопротивления контакта, собственной теплоемкости нагревателя и инерционности термоприемника, которая способствует повышению точности определения ТФХ. Проведена оценка методических и метрологических погрешностей эксперимента - погрешность определения коэффициентов теплопроводности в режимах "определение" и "контроль" не превышает соответственно 10 и 7 %, а температуропроводности - 15 и 12 %.

6. Проведено экспериментальное исследование ТФХ различных типов ГМ. Показана целесообразность применения среднеинтегральных термозондов для исследования средне- и крупнодисперсных неоднородных ГМ. Результатами испытаний подтверждены теоретические расчеты погрешностей определения ТФХ.

7. Сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных значений ТФХ представительных образцов ГМ показал, что расхождения между ними лежат в пределах погрешности измерений свойств материалов и исходной информации о структуре, причем лучшее совпадение дают расчеты, использующие результаты стереологического анализа; предложенный способ учета экранирующего эффекта термического сопротивления контакта зернистого слоя с граничной плитой дает возможность существенно сузить ширину зоны предсказуемых значений эффективной теплопроводности зернистых материалов с резко отличающимися проводимостями компонентов; разработанный метод аналитического определения эффективной теплопроводности и модель квазиоднородного тела для расчета эффективной температуропроводности позволяют прогнозировать комплекс ТФХ образцов ГМ при выполнении условия представительности.

8. Результаты разработок внедрены на ряде предприятий для определения и контроля ТФХ материалов различных изделий и пищевых продуктов, что дало экономический эффект 272 тыс.руб.

Основное содержание диссертации нашло отражение в следующих публикациях:

1. А.с.832433 (СССР). Способ определения теплофизических характеристик материалов/ Г.М.Серых, Б.П.Колесников - Оpubл. в Б.И., 1981, № 19.

2. Серых Г.М., Колесников Б.П., Сысоев В.Г. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов.- Промышленная теплотехника, 1981, т.3, № 1, с.85-91.

3. А.с.894512 (СССР). Устройство для определения теплофизических характеристик материалов/ Б.П.Колесников, Г.М.Серых, В.Г.Сысоев - Оpubл. в Б.И., 1981, № 48.

4. Прибор для экспрессного измерения теплофизических характеристик неметаллических материалов/ Г.М.Серых, Б.П.Колесников, В.Г.Сысоев и др.- Приборы и техника эксперимента, 1982, № 2, с.229.

5. Серых Г.М., Колесников Б.П. Комплексное определение теплофизических характеристик материалов неразрушающим способом.- Изв.Северо-Кавказск.научного центра высшей школы. Технические науки, 1982, № 3, с.49-52.

6. Серых Г.М., Колесников Б.П. Расчет проводимости композиционных материалов с учетом их реальной структуры.- Тезисы стендовых докладов УП Всес.конф.по теплофизическим свойствам веществ. Ташкент, 1982, с.184-186.

7. А.с.949448 (СССР). Способ определения теплофизических характеристик материалов/ Б.П.Колесников, Г.М.Серых, В.Г.Сысоев - Оpubл. в Б.И., 1982, № 29.

8. Колесников Б.П., Серых Г.М. Эффективный коэффициент температуропроводности гетерогенных систем с хаотической структурой.- Краснодар, 1983.- 13 с.- Рукопись представлена Краснодарск. политехн.ин-том. Деп.в ИНФОРМЭЛЕКТРО 16 февр.1983, № 312эт-Д83.

9. Серых Г.М., Колесников Б.П. Проводимость гетерогенных материалов и выбор корректного образца.- Изв.вузов СССР, Пищевая технология, 1984, № 1, с.123-128.

10. Прибор для неразрушающего определения и контроля теплофизических характеристик гомогенных и мелкодисперсных материалов/ Г.М.Серых, Б.П.Колесников, В.Г.Сысоев, И.Н.Рывкин и др.- Краснодар: КЦНТИ, 1984 - 4 с.- (Информ.листок/ Краснодарск. ЦНТИ, № 269-84.

11. Прибор для определения теплофизических характеристик гетерогенных материалов/ Б.П.Колесников, Г.М.Серых, В.Г.Сысоев, И.Н.Рывкин и др. Краснодар: КЦНТИ, 1984,- 4 с.- (Информ.листок/ Краснодарск. ЦНТИ № 270-84.

12. Установка для неразрушающего контроля теплофизических характеристик изделий из полимерных композиционных материалов с применением микро-ЭВМ/ Б.П.Колесников, Г.М.Серых, В.Г.Сысоев, И.Н.Рывкин и др.- Краснодар: КЦНТИ, 1984.- 4 с.- (Информ.листок/ Краснодарск. ЦНТИ № 271-84.

13. Многоканальная автоматизированная установка для определения теплофизических характеристик материалов/ В.Г.Сысоев, Б.П.Колесников, Г.М.Серых, И.Н.Рывкин и др.- Краснодар: КЦНТИ, 1984.- 4 с.- (Информ.листок/ Краснодарск. ЦНТИ № 490-84.

14. А.с.1122952А (СССР). Устройство для неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов/ Г.М.Серых, Б.П.Колесников, В.Г.Сысоев - Оpubл. в Б.И., 1984, № 41.