

**Акулинин Игорь Николаевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре «Переработка полимеров и упаковочное производство» Тамбовского государственного технического университета.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
*ляев Павел Серафимович*

**Бе-**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор

*Чернышов Владимир Николаевич*

кандидат технических наук, доцент

*Суслин Михаил Алексеевич*

**Ведущая организация:** ОАО «Научно-исследовательский институт резинотехнического машиностроения»,  
г. Тамбов

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_ ч \_\_\_ мин на заседании диссертационного совета Д.212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392062, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, по адресу: 392062, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А.А. Чуриков

---

---

Подписано к печати 27.10.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 726

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационной работы.** Объектами исследования данной диссертационной работы являются резиновые смеси, перерабатываемые в изделия в условиях гидростатического давления, и термопласты, перерабатываемые в условиях осесимметричного сжатия современными методами твердофазной экструзии, объемной и листовой штамповки в твердой фазе.

При переработке резиновых смесей в изделия методами экструзии и прессования необходимо располагать данными по изменению теплофизических характеристик (ТФХ) используемых материалов от температуры и давления.

При переработке термопластов так называемое формование в твердой фазе ведется в температурном интервале, заключенном между комнатной температурой  $T_k$  и температурой стеклования  $T_c$  для аморфных полимеров или температурой плавления  $T_{пл}$  – для кристаллизующихся. Для проведения оптимального нагрева перерабатываемых полимеров необходимо располагать информацией о зависимости их теплофизических свойств от приложенного давления обработки в указанных интервалах температур, что позволяет при проведении технологического процесса обработки полимера не переходить в область фазовых переходов, обеспечивая заданное качество изделия и экономию энергоресурсов.

Значительный рост числа разрабатываемых новых полимерных материалов (ПМ) и существенное изменение ТФХ известных полимеров при использовании различных легирующих компонентов с целью обеспечения заданного качества изделий, приводит к выводу о необходимости разработки новых аналитических методов и измерительных устройств для оперативного контроля теплофизических свойств полимерных материалов и изделий из них, учитывающих зависимость их теплофизических характеристик от температуры и давления. Решению этой актуальной задачи и посвящена данная работа.

Настоящее исследование проводилось в соответствии с координационным планом АН СССР на 1976 – 80 гг. по комплексной проблеме «Теплофизика», по программе Минобразования РФ «Получение материалов с заранее заданными свойствами», координационным планом «Разработка основ процессов получения полимерных материалов с заданными характеристиками», координационным планом работ Научного совета РАН по комплексной проблеме «Теплофизика и теплотехника» на 1993 – 2000 гг., межвузовской отраслевой научно-технической программой «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении».

**Целью работы** является разработка нового метода и автоматизированной системы контроля зависимости ТФХ полимерных материалов от температуры и давления.

Для достижения этой цели: а) разработаны физическая модель измерительной ячейки и математическая модель теплового процесса в ней; б) разработан метод, позволяющий повысить точность измерения комплекса ТФХ ПМ и оперативность определения их зависимости от температуры и давления; в) проведен анализ возможных источников погрешностей и даны теоретические оценки погрешностей измерения ТФХ разработанным методом; г) на основании выполненного анализа источников погрешностей измерения ТФХ разработаны конструкции измерительных ячеек для двух классов материалов и характера силового воздействия на них при получении изделий; д) разработано математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение автоматизированной системы контроля (АСК) ТФХ ПМ; е) проведены метрологические исследования разработанной АСК; ж) проведено исследование теплофизических характеристик ряда резиновых смесей и термопластов.

**Предметом исследования** является разработка совокупности математического, алгоритмического и технического обеспечения метода и автоматизированной системы контроля ТФХ полимерных материалов в зависимости от параметров их переработки в изделия.

**Методы исследования.** При выполнении диссертационной работы были использованы методы математической физики, статистики, а также численные методы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

На основе полученных решений нестационарной нелинейной краевой задачи теплопроводности разработан метод измерения теплофизических характеристик образцов полимерных материалов, позволяющий повысить точность измерения за счет выбора оптимальных конструктивных параметров измерительной ячейки и режимных параметров проведения эксперимента, и оперативность контроля зависимости ТФХ от параметров переработки анализируемых материалов в изделия – за счет обеспечения возможности контроля изменения искомым характеристик от температуры в одном опыте при заданном давлении переработки.

Разработано алгоритмическое обеспечение процессов измерения и обработки экспериментальных данных, позволяющее автоматизировать управление экспериментом, повысить оперативность и точность измерений.

На основе выполненного метрологического анализа определены доминирующие источники погрешностей, что позволило выработать рекомендации по повышению точности измерений.

Определены зависимости ТФХ ряда резиновых смесей и полимерных материалов от технологических параметров переработки их в изделия.

**Практическая значимость.** Создана автоматизированная система контроля для измерения зависимости ТФХ резиновых смесей от температуры и гидростатического давления переработки их в изделия, и термопластов от температуры и давления осесимметричного сжатия при переработке в твердой фазе.

Результаты исследования ТФХ ПМ использовались при математическом моделировании температурных полей в изделиях из полимерных материалов. Проведенные расчеты позволили повысить качество резиновых изделий за счет исключения явлений подвулканизации при их формовании, повысить качество изделий из термопластов при твердофазной переработке, исключить необоснованные энергозатраты на обеспечение фазовых и физических переходов в них.

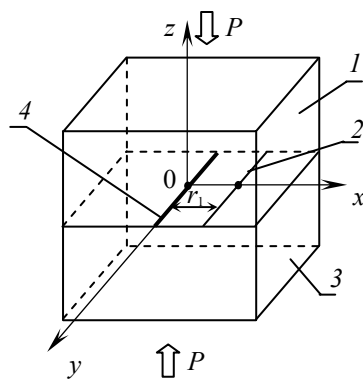
Результаты работы приняты к использованию в НПО «Технология» (г. Обнинск, 1979), Каз. НИИХП (г. Казань, 1980, 1981, 1984, 1986), ВНИИРТмаш (г. Тамбов, 1981), ВНИИПИМ (г. Тула, 1991), НПП «Модуль» (г. Тамбов, 1995), ООО «Айбикомс» (г. Москва, 1999), НПП «Эласт» (г. Тамбов, 2002).

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на Всесоюзной конференции «Тепло-, массообмен и моделирование в энергетических установках» (г. Тула, 1979), на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Современное состояние теплофизического приборостроения» РДЭНТП, ИТТФ АН УССР (г. Киев, 1980), на Республиканской конференции «Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза» (г. Тамбов, 1987), на XIX научно-технической конференции Пермского политехнического института (г. Пермь, 1979). На Всесоюзной научно-технической конференции «Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия» (г. Москва, 1982), на Всесоюзной научной конференции «Процессы и оборудование для гранулирования продуктов микробиологического синтеза» (г. Тамбов, 1984), на IX Всесоюзной теплофизической школе «Новейшие исследования в области теплофизических свойств» (г. Тамбов, 1988), на Второй международной теплофизической школе «Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения» (г. Тамбов, 1995), на Третьей международной теплофизической школе «Новое в теплофизических свойствах» (г. Тамбов, 1998), на Пятой международной теплофизической школе «Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством» (г. Тамбов, 2004), на XXXVIII и XXXIX научно-технических конференциях МИХМа (г. Москва, 1979, 1981). На научных конференциях ТИХМа (г. Тамбов, 1976, 1993) и на II, III и IV научных конференциях ТГТУ (г. Тамбов, 1995, 1996, 1999).

По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ.

Автор выражает глубокую признательность за идейное руководство за- служенному деятелю науки и профессору Сергею Владимировичу Мищенко, заложившему основы данной работы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Основная часть диссертации изложена на 134 страницах машинописного текста, 30 рисунков. Список литературы включает 152 наименования. В работе имеются четыре приложения на 41 странице.



благодарность за идейное руководство за- служенному деятелю науки и профессору Сергею Владимировичу Мищенко, заложившему основы данной работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Основная часть диссертации изложена на 134 страницах машинописного текста, 30 рисунков. Список литературы включает 152 наименования. В работе имеются четыре приложения на 41 странице.

**Рис. 1 Физи- СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цели и задачи работы, отмечена научная новизна, практическая значимость, основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор и сравнительный анализ методов и устройств для определения зависимости ТФХ твердых полимерных материалов от температуры и давления.

Известные методы и устройства для определения зависимости ТФХ от температуры и давления не удовлетворяют недостаточными производительностью и информативностью существующих методов и устройств; недостаточностью теоретического и метрологического обоснования; необходимостью проведения серий опытов для построения зависимости искомых ТФХ от параметров переработки ПМ в изделия.

В результате проведенного анализа определены цели и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены теоретические основы предлагаемого метода определения ТФХ полимерных материалов, находящихся в твердом агрегатном состоянии, в зависимости от температуры и давления.

Рассмотрим физическую модель теплового процесса, реализуемую в исследуемых материалах, при использовании предложенного метода (рис. 1).

Имеются два полуограниченных в тепловом отношении тела 1 и 3 из исследуемого материала, выполненных в виде параллелепипедов, на которые действует осесимметричная или гидростатическая нагрузка  $P$ . В плоскости контакта исследуемых тел действует линейный источник 4 постоянной мощности  $q_L$ , совмещенный с измерителем температуры (на чертеже не показано). На расстоянии  $r_1$  от линейного источника 4 параллельно ему расположен термоприемник 2. При составлении математической модели теплового процесса в рассматриваемой системе тел предполагаем, что поверхность контакта двух тел – идеальная плоскость; в начальный момент времени  $t = 0$  температура тел постоянна и равна  $T_H$ ; мощность линейного источника постоянна  $q_L = \text{const}$ ; в плоскости контакта отсутствует термосопротивление; материал исследуемых тел изотропен и тепло в них распространяется по закону Фурье; время измерения температуры и геометрические размеры тел таковы, что их можно считать полубесконечными в тепловом отношении. При сделанных предположениях процесс переноса тепла в полуограниченном теле, подверженном действию внешнего давления, описывается краевой задачей:

$$C\gamma(T, P) \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T, P) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] + \frac{3\alpha}{J} T(r, t) \frac{dP(t)}{dt}; \quad (1)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < \infty, \quad T(r, 0) = T_H = \text{const}; \quad (2)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left( 2\pi r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = -\frac{q_L}{\lambda(T,P)}, \quad q_L = \text{const}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0. \quad (4)$$

Правая часть уравнения (1) описывает эффекты, возникающие в материале при действии на него внешнего давления.

Уравнение состояния для твердых полимеров имеет вид

$$(P(r,t) + \pi)(V(T(r,t)) - b_0) = \frac{R}{M} (T(r,t) - T_0), \quad (5)$$

$$\text{где} \quad V(T(r,t)) = V_H (1 + 3\alpha(T(r,t) - T_H)). \quad (6)$$

Уравнение (1) с учетом (5), (6) преобразуется к виду:

$$C\gamma(T,P) \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T,P) \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] + 3\alpha R T(r,t) \times \\ \times \frac{\left[ \frac{dT(r,t)}{dt} [V(T(r,t)) - b_0] - 3\alpha V_H (T(r,t) - T_0) \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \right]}{JM [V(T(r,t)) - b_0]^2}. \quad (7)$$

Краевую задачу (7), (2) – (4) с распределенными параметрами, используя преобразование Больцмана  $\xi = \frac{r}{2\sqrt{t}}$ , можно свести к задаче с сосредоточенными параметрами:

$$-2\xi \bar{C}\gamma(\xi) \frac{d\bar{T}(\xi)}{dt} = \frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left[ \xi \bar{\lambda}(\xi) \frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi} \right] - 3\alpha R \bar{T}(\xi) \left( -\frac{\xi}{2t} \right) \times \\ \times \frac{\left[ \frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi} [V(\bar{T}(\xi)) - b_0] - 3\alpha V_0 \bar{T}(\xi) \frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi} \right]}{JM [V(\bar{T}(\xi)) - b_0]^2}; \quad (8)$$

$$\xi > 0, \quad \bar{T}(\infty) = T_H = \text{const}; \quad (9)$$

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} \left[ 2\pi \xi \bar{\lambda}(\xi) \frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi} \right] = \bar{q}_L, \quad \bar{q}_L = \text{const}. \quad (10)$$

При этом имеются связи:

$$\frac{T(r,t)}{\partial r} = -\frac{2t}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t}; \quad (11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T,P) \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] = \frac{2t}{r} \frac{\partial q(r,t)}{\partial t}. \quad (12)$$

Для обеспечения возможности определения не эффективных, а истинных значений ТФХ, тепловое воздействие организуют при постоянном внешнем давлении ( $P = P_i = \text{const}, i = 1, 2, \dots, n$ ) после выравнивания температуры в образце, вызванным изменением давления. При этом на каждом интервале из-

менения давления определяется температурная зависимость искомым теплофизических свойств. Расчетные выражения, полученные из (1), (3) с учетом, соответственно, (12), (11), имеют вид:

$$C\gamma(T)_{p=p_i=\text{const}} = \frac{2t}{r_1} \frac{dq(r_1, t)}{dt} \bigg/ \frac{dT(r_1, t)}{dt}; \quad (13)$$

$$\lambda(T)_{p=p_i=\text{const}} = \frac{q_L}{4\pi t \frac{\partial T(r_0, t)}{\partial t}}, \quad r_0 > 0. \quad (14)$$

Таким образом для определения температурной зависимости искомым ТФХ при заданном давлении  $P_i$  необходимо в течение эксперимента получить термограммы на нагревателе и в сечении  $r_1$  при известном постоянном значении мощности нагревателя.

**В третьей главе** сформулирована и решена задача оптимизации конструкции измерительных устройств для определения зависимости ТФХ полимерных материалов от температуры и давления разработанным методом.

Постановка задачи оптимизации. Для заданного класса исследуемых полимерных материалов и диапазонов изменения технологических переменных переработки их в изделия (температуры  $T$  и давления  $P$ ) требуется выбрать такие конструктивные параметры ( $H, L, r_0, r_1$ ) измерительных устройств, при которых погрешности определения ТФХ достигают минимального значения:

$$\delta_\lambda(H, L, r_0) \rightarrow \min; \quad \delta_{C\gamma}(H, L, r_0, r_1) \rightarrow \min; \quad (15)$$

при связях в форме математической модели (2) – (4), (7), (13), (14) и ограничениях:

$$T(r_0, t) \leq T_{\text{доп}}; \quad P \leq P_{\text{доп}},$$

где  $T_{\text{доп}}, P_{\text{доп}}$  – предельные допустимые значения параметров переработки полимерных материалов.

Минимальный размер образца определялся из решения нелинейной задачи теплопроводности при условии обеспечения максимального отклонения температуры на границе образца не выше 1,1 % в соответствии с точностью измерения температуры.

Высоту образца (длину нагревателя) находили из условия

$$H/(2r_0) \geq 30 \quad (16)$$

отсутствия заметного влияния осевых потоков тепла в линейном нагревателе.

В экспериментальных исследованиях мы использовали исследуемые образцы в виде цилиндра или параллелепипеда высотой не менее 50 мм и диаметром или стороной квадрата основания 50 мм при максимальном радиусе нагревателя  $r_0 = 0,4$  мм.

Относительные погрешности определения искомым теплофизических характеристик (на основе разработанных в главе 5 математических моделей погрешностей) могут быть выражены в виде:

$$\delta_\lambda = \sqrt{\delta_1^2 + \sum_{i=1}^n \delta_i^2(\lambda)}; \quad \delta_{C\gamma} = \sqrt{\delta_2^2 + \sum_{i=1}^n \delta_i^2(C\gamma)}, \quad (17)$$

где  $\delta_2$  – объединенная компонента погрешностей, зависящая от конструктивных параметров измерительных устройств;  $\delta_1, \delta_i(\lambda)$  и  $\delta_i(C\gamma)$  – компоненты погрешностей, для которых приняты оценки сверху.

Анализ объединенной компоненты  $\delta_2$  показал, что ее зависимость от координаты  $r_1$  носит экстремальный характер, а минимальное значение достигается при  $r_1 = 8 \cdot 10^{-3}$  м. Это позволило определить координату расположения термоприемника 2 (рис. 1) в разрабатываемом устройстве. Оценка влияния различных компонентов на объединенную погрешность при изменении координаты поверхности  $r_1$

проводилась численным методом с использованием алгоритма решения прямой нелинейной задачи теплопроводности.

**В четвертой главе** дано описание автоматизированной системы контроля теплофизических свойств резиновых смесей в зависимости от температуры и гидростатического давления и термопластов в зависимости от температуры и давления осесимметричного сжатия.

Автоматизированная система контроля, структурная схема которой приведена на рис. 2, включает в свой состав следующие элементы: 5 – измерительную ячейку № 1, предназначенную для исследования

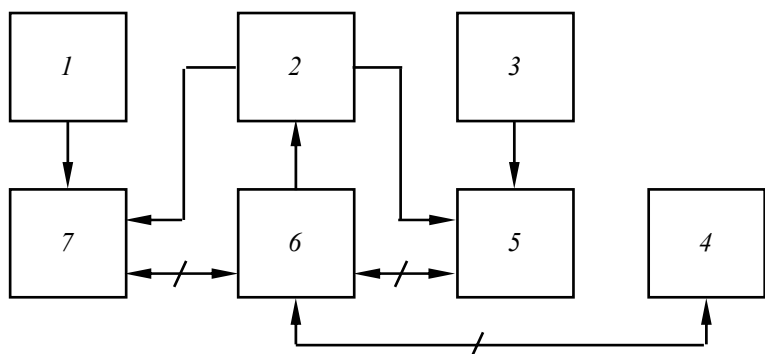


Рис. 2 Структурная схема автоматизированной системы контроля

теплофизических свойств резиновых смесей, подверженных влиянию гидростатического давления; 7 – измерительную ячейку № 2, предназначенную для исследования ТФХ термопластов, подверженных действию осесимметричного сжатия; устройство задания температурного режима 2, обеспечивающее необходимый режим нагрева исследуемых образцов; систему задания гидростатического давления 3 для измерительной ячейки № 1, позволяющую создавать в этом устройстве постоянное давление в диапазоне

0...50 МПа и поддерживать его на постоянном значении в течение всего эксперимента; устройство задания давления 1 для измерительной ячейки № 2, обеспечивающее создание осесимметричной нагрузки на исследуемый образец (используется гидравлический пресс с усилием 100 тонн); блок согласования 6; персональную электронную вычислительную машину 4 с клавиатурой, дисплеем, принтером, укомплектованную адаптером с ЦАП, АЦП и таймером.

Измерительная ячейка № 1 (рис. 3) представляет собой массивный цилиндр 2 диаметром 160 мм и высотой 185 мм, изготовленный из стали 2Х13, рекомендованной для изготовления аппаратов, работающих под давлением. В одном из оснований цилиндра сделана цилиндрическая полость диаметром 80 мм и высотой 95 мм. В эту полость помещается образец исследуемого материала 3, внутри которого размещены электрический нагреватель и преобразователи температуры.

В качестве жидкости 1, передающей гидростатическое давление на исследуемый образец, используется трансформаторное масло. В нижней части цилиндра имеются расположенные диаметрально противоположно четыре отверстия.

одно для присоединения манометра к резервное и два для вводов 6 в № 1 термоэлектродных проводников проводов 5 для питания нагревателя. Самоуплотняющиеся прокладки (кольца 8, 9, 12, 15 подтягиваются при помощи колец 7, 10 и втулки 13. Крышка помощи восьми винтов 11. Данная конструкция уплотнения измерительной ячейки позволяет проводить эксперименты в диапазоне изменения давления 0...100 МПа.

Для обеспечения надежной герметизации используется прокладка из маслостойкой резины) крышки 14, прижимных крепится к корпусу при

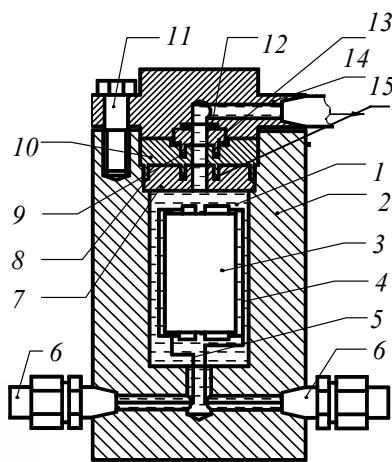


Рис. 3 Измерительная ячейка № 1

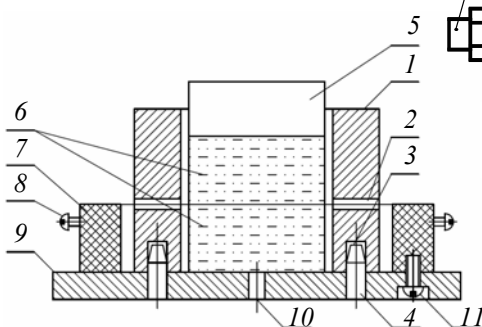


Рис. 4 Измерительная ячейка № 2

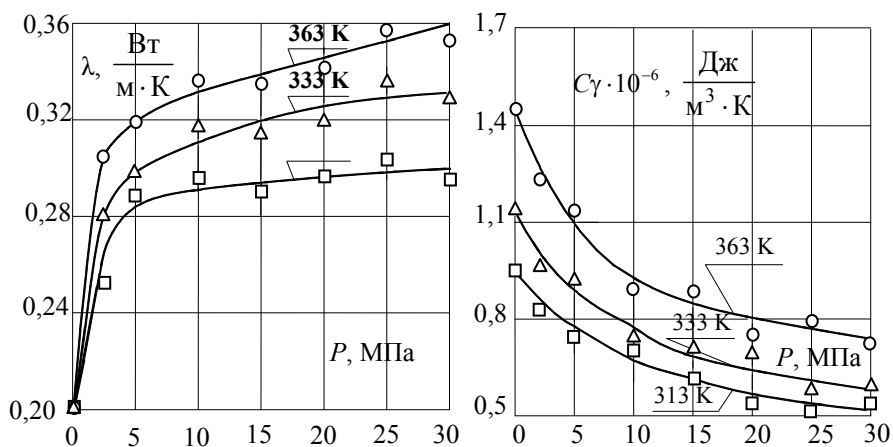
Измерительная ячейка № 2 состоит из корпуса 1 (рис. 4), и основания 9, выполненных из стали 2Х13. В корпусе 1 имеются два отверстия 3, в которые вставляются колонки 4, обеспечивающие совместно с двумя винтами (на рисунке не показаны) крепление корпуса к основанию. Внутри корпуса 1 имеется



квадратное отверстие, в которое помещается образец исследуемого материала 6. Образец исследуемого материала состоит из двух пластин, между которыми помещают нагреватель и три преобразователя температуры. Размер стороны квадрата – 52 мм. Такой размер отверстия, а следовательно, и размещенного в нем образца исследуемого материала обеспечивает соблюдение адекватности математической модели физическому тепловому процессу, реализованному в измерительном устройстве. К основанию 9 при помощи четырех винтов 11 крепятся два диэлектрических основания 7, выполненных из стеклотекстолита. На диэлектрических основаниях 7 расположены две клеммные колодки (на чертеже не показаны), которые имеют по четыре винта 8, предназначенных для растяжки нагревателя и преобразователей температуры.

В корпусе 1 с противоположных сторон имеются три отверстия 2 диаметром 6 мм. Центральное предназначено для ввода в измерительную ячейку электрического нагревателя и преобразователя температуры, измеряющего температуру внешней поверхности нагревателя. Второе отверстие служит для ввода преобразователя температуры, размещенного в координате  $r_1 = 8$  мм, третье – для преобразователя температуры, размещенного на внешней поверхности образца и служащего для исключения методической погрешности метода из-за несоблюдения условий полуограниченности исследуемых образцов. Все применяемые термопары – хромель-копелевые, сваренные встык с диаметром термоэлектродов 0,1 мм. Клеммные колодки с размещенными на них винтами 8 гальванически соединены с разъемом (на чертеже не показан), служащим для подключения нагревателя и термопар к источнику питания и блоку согласования. Отверстие 10 служит для удаления исследуемого образца из измерительной ячейки. Сверху на исследуемый образец 6 помещается пуансон 5. К основанию 9 крепятся две ручки для удобства перемещения измерительной ячейки (на рисунке не показаны).

На разработанной АСК исследовано влияние давления и температуры на ТФХ ряда резиновых смесей и термопластов. На рис. 5 приведена зависимость ТФХ резиновой смеси 7-В-14 от температуры и гидростатического давления. На рис.6 представлена зависимость ТФХ полипропилена от температуры и давления осесимметричного сжатия.

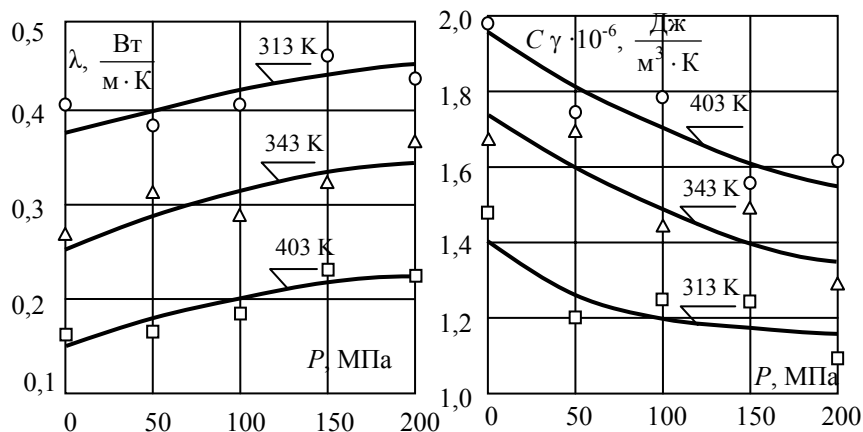


Оценка достоверности полученных результатов осуществлялась в результате исследования адекватности выбранной математической модели физическому процессу, реализованному в эксперименте, и устойчивости метода. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых изменения температуры в различных сечениях образцов подтвердили адекватность используемой математической модели. Работоспособность разработанных метода и АСК подтверждена также в результате экспериментов на образцовом материале – полиметилметакрилате – в отсутствии давления на образец.

**В пятой главе** приведены результаты расчетной и экспериментальной оценок погрешностей измерения теплофизических характеристик рассматриваемого класса материалов с использованием разработанных метода и устройств. Оценены погрешности, обусловленные: а) тепловой инерцией преобразователей температуры; б) искажением температурного поля термопреобразователями; в) погрешностью измерения ЭДС преобразователей; г) погрешностью градуировки термопар; д) отличием реальной статической характеристики термоприемника от номинальной, включая погрешность аппроксимации; е) погрешностью нормализации и квантования сигнала; ж) погрешностью округления результата АЦП при

считывании;

з) погрешностью округления конечного результата.



Рассмотрены источники погрешностей при измерении теплофизических характеристик: а) частичное несоблюдение граничных условий; б) инструментальные погрешности, обусловленные несовершенством технических средств измерения; в) погрешности алгоритмов обработки данных эксперимента, обусловленные заменой функциональных зависимостей упрощенными аппроксимирующими выражениями. В результате получены математические модели погрешностей, описывающие зависимость относительных погрешностей измерения искомым ТФХ от погрешностей непосредственно измеряемых величин (температуры, давления, геометрических размеров и др.). Проведенные исследования показали, что существенное влияние на результат измерения ТФХ вносит величина координаты расчетной поверхности  $r_1$ . Разработанные методы и алгоритмы оптимизации конструкторских решений при проектировании измерительных устройств по критерию точности позволили определить оптимальное значение  $r_1$  для рассматриваемого класса материалов, что легло в основу разработанных устройств.

В результате получены следующие оценки относительных погрешностей определения искомым характеристик:  $\delta_\lambda = 7,5 \%$ ,  $\delta_{C_\gamma} = 12,3 \%$ .

После изготовления измерительных устройств и АСК были выполнены работы по экспериментальной оценке погрешностей определения ТФХ. Случайную составляющую погрешности определяли традиционным способом, путем статистической обработки результатов многократных испытаний. Установлено, что случайная погрешность результатов измерений не превышает для: теплопроводности – 6 %, объемной теплоемкости – 9 % при доверительной вероятности 0,95 %.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 На основании выполненного анализа требований к методу и устройству для измерения ТФХ разработана физическая модель измерительной ячейки, представляющая собой симметричную плоскую двухслойную систему, в плоскости контакта которой расположены линейный нагреватель, с закрепленным на нем термопреобразователем, и дополнительный термопреобразователь, находящийся на заданном расстоянии от нагревателя. Измерительная ячейка находится под воздействием внешнего гидростатического давления или в условиях осесимметричного сжатия.

2 Для разработанной физической модели поставлена и решена нелинейная краевая задача нестационарной теплопроводности. Разработан метод, обеспечивающий повышение точности измерения ТФХ образцов полимерных материалов в зависимости от температуры и давления за счет выбора оптимальных конструктивных параметров измерительной ячейки и режимных параметров проведения эксперимента. К оптимальным конструктивным параметрам измерительной ячейки относятся: а) симметрия разработанной физической модели, позволяющая исключить необходимость ис-

пользования тепломеров для измерения тепловых потоков в подложку и эталонных материалов в конструкции измерительной ячейки;

б) допустимые размеры образца и нагревателя, обеспечивающие ограничение на величину методической погрешности; в) расстояние от термоприемника до нагревателя для заданного класса исследуемых материалов. К режимным параметрам разработанного метода относятся: рациональная длительность этапов эксперимента, обеспечивающих заданную величину методической погрешности и рациональная мощность нагревателя измерительной ячейки, обеспечивающая отсутствие фазовых переходов в исследуемых материалах в течение всего эксперимента.

3 Разработанный метод позволяет повысить оперативность контроля зависимости ТФХ от параметров переработки анализируемых материалов в изделия за счет обеспечения возможности контроля изменения искомых характеристик от температуры в одном опыте при заданном давлении переработки.

4 Разработана автоматизированная система контроля ТФХ полимерных материалов в зависимости от температуры и давления переработки. АСК укомплектована двумя измерительными ячейками: № 1 – для исследования ТФХ резиновых смесей при внешнем гидростатическом давлении и № 2 – для исследования ТФХ термопластов, допускающих переработку в твердой фазе, при осесимметричном сжатии. Предложено алгоритмическое и программное обеспечение для разработанной АСК, включающего алгоритмы управления процессом измерения и обработки экспериментальных данных.

5 Проведена экспериментальная проверка работоспособности АСК на ряде полимерных материалов, показавшая работоспособность разработанного метода. Оценены систематические и случайные погрешности измерения ТФХ.

6 Определены зависимости ТФХ ряда резиновых смесей и термопластов от технологических параметров переработки их в изделия.

7 Результаты выполненных исследований внедрены на предприятиях СССР и России. Суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы около 900 тыс. р.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$C_V$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м · К);  $T$  – температура, К;  $P$  – давление, Па;  $q_L$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  – пространственная координата, м;  $t$  – время, с;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения, 1/К;  $J$  – механический эквивалент теплоты, кал/Дж;  $\pi$  – внутреннее давление, Па;  $M$  – молекулярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(Моль · К);  $T_H$  – начальная температура, К;  $b$  – константа;  $b_0$ ,  $T_0$  – координаты «полюса» веера дилатометрических прямых;  $V(T(x, t))$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $V_H$  – удельный объем исследуемого материала при температуре  $T_H$ ;  $H$ ,  $r_0$  – длина и радиус нагревателя, м;  $L$  – габаритные размеры образца, м;  $\delta$  – относительная погрешность, %; ПМ – полимерный материал; ТФХ – теплофизические характеристики; АСК – автоматизированная система контроля; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина.

Основные материалы, отражающие содержание диссертационной работы, изложены в следующих публикациях.

- 1 О решении некоторых обратных нелинейных задач тепло-, массопереноса с помощью подстановки Больцмана / И.Н. Акулинин, В.В. Власов, С.В. Мищенко, А.В. Лопандя // Функционально-дифференциальные уравнения и краевые задачи математической физики. Пермь, 1978. С. 3 – 8.
- 2 Решение обратных задач тепло-, массопереноса с помощью подстановки Больцмана / В.В. Власов, С.В. Мищенко, П.С. Беляев, И.Н. Акулинин, А.В. Лопандя, А.А. Гухман // Теплообмен и моделирование в энергетических установках: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тула, 1979. Ч. 1. С. 111 – 112.
- 3 Устройства для измерения теплофизических характеристик твердых и жидких сред / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев, С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, В.Г. Серегина // Промышленная теплотехника. 1981. Т. 3. № 1. С. 38 – 43.
- 4 Акулинин И.Н. Определение зависимости теплофизических свойств твердых и сыпучих материалов от температуры и давления / И.Н. Акулинин, А.А. Чуриков // Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза: Тез. докл. Республик. науч. конф. Тамбов, 1981. С. 211 – 212.
- 5 Акулинин И.Н. Исследование влияния давления и температуры на теплофизические свойства полимерных материалов / И.Н. Акулинин, А.А. Чуриков // Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1982. С. 162.
- 6 Акулинин И.Н. Математическая модель процесса переноса тепла в твердых и сыпучих материалах под давлением / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев, С.В. Мищенко // Процессы и оборудование для гранулирования продуктов микробиологического синтеза: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тамбов, 1984. С. 17.
- 7 Мищенко С.В. Методы исследования зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления / С.В. Мищенко, И.Н. Акулинин. Тамбов: Тамб. ин-т хим. машиностроения, 1987. 32 с. Деп. в ОНИИ-ТЭХИМ, № 254–ХП–87.
- 8 Акулинин И.Н. Установка для исследования зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления / И.Н. Акулинин, В.М. Жилкин // Новейшие исследования в области теплофизических свойств: Тез. докл. Всесоюз. совещ.-семинара. Тамбов, 1988. С. 78.
- 9 Акулинин И.Н. Исследование зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления // Новейшие исследования в области теплофизических свойств: Тез. докл. Всесоюз. совещ.-семинара. Тамбов, 1988. С. 96 – 97.
- 10 Акулинин И.Н. Методы и устройства для исследования тепловых свойств полимеров // II научная конференция ТГТУ: Тез. докл. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1995. С. 88.
- 11 Акулинин И.Н. Методы определения тепловых свойств материалов // II научная конференция ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 1995. С. 87 – 88.
- 12 Акулинин И.Н. Исследование зависимости тепловых свойств материалов от температуры и давления // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. II Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 1995. С. 222.
- 13 Акулинин И.Н. Оценка точности определений тепловых свойств материалов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. II Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 1995. С. 250.

14 Акулинин И.Н. О точности теплофизического эксперимента // III научная конференция ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 1996. С. 70.

15 Акулинин И.Н. Автоматизированная система для теплофизических испытаний // III научная конференция ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 1996. С. 70 – 71.

16 Акулинин И.Н. Метод определения зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев, С.В. Мищенко // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10, № 3. С. 642 – 646.

17 Акулинин И.Н. Оптимизация технологических решений при определении зависимости теплофизических свойств полимеров от температуры и давления / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев // Теплофизические измерения при управлении контролем и качеством: Материалы V междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 2004. Ч. 2. С. 104 – 105.

18 Акулинин И.Н. Автоматизированная система контроля зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев // Теплофизические измерения при управлении контролем и качеством: Материалы V междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 2004. Ч. 2. С. 44 – 45.