

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

И.Н. Акулинин<sup>1</sup>, П.С. Беляев<sup>2</sup>

*Кафедры: «Электрооборудование и автоматизация» (1),  
«Переработка полимеров и упаковочное производство» (2),  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; akulinin-2006@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** автоматизированная система; гидростатическое давление; измерительная ячейка; осесимметричное сжатие; полимерные материалы; температура; теплофизические свойства.

**Аннотация:** Рассматривается автоматизированная система для определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления. Приведено описание конструкции измерительных ячеек, представлены результаты экспериментальных исследований.

### Обозначения

$a$ – температуропроводность, м/с <sup>2</sup> ;	$t$ – время, с;
$C\gamma$ – объемная теплоемкость, Дж/(м <sup>3</sup> ·К);	$T$ – температура, К;
$P$ – давление, МПа;	$x$ – пространственная координата, м;
$q$ – плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> ;	$\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·К);
$q_l$ – линейная плотность теплового потока, Вт/м;	$n$ – нагреватель.

Теплофизические свойства (ТФС) являются одними из важных характеристик полимерных материалов. При обработке полимеров в твердом агрегатном состоянии давлением информация о зависимости их ТФС от температуры и давления переработки позволяет обеспечить заданное качество готового изделия, снизить энергоемкость технологического процесса и избежать попадания в область фазовых переходов.

В работе [1] предложен метод определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления и получены формулы для определения теплопроводности (1), объемной теплоемкости (2):

$$\lambda(T)_{p=p_i} = \frac{q_l}{4\pi t \frac{dT(x_0, t)}{dt}}; \quad (1)$$

$$C\gamma(T)_{p=p_i} = \frac{2tdq(x_1, t)}{x_1 dt} \bigg/ \frac{dT(x_1, t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $q(x_1, t) = \lambda(T)_{p=p_i} \frac{2tdT(x_1, t)}{x_1 dt}$  – расчетное значение плотности теплового потока на поверхности  $x = x_1$  исследуемого образца;  $q_l$  – линейная плотность теплового потока нагревателя.

Температуропроводность исследуемых полимерных материалов определяется по формуле

$$a(T)_{p=p_i} = \lambda(T)_{p=p_i} / C_V(T)_{p=p_i} \cdot \quad (3)$$

Согласно формулам (1) – (3) для расчета ТФС полимерных материалов необходимо в течение эксперимента измерять температуру  $T(x_0, t)$  на внешней поверхности нагревателя  $x = x_0$ , температуру  $T(x_1, t)$  на поверхности  $x = x_1$  исследуемого образца, мощность нагревателя и постоянное, в течение одного конкретного эксперимента, давление  $p_i = \text{const}$ .

Для обеспечения возможности определения истинных значений ТФС, тепловое воздействие в эксперименте организуется 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 изменения давления определяется температурная зависимость искомых теплофизических свойств по формулам (1) – (3).

Для реализации предложенного метода разработана автоматизированная система (АС), структурная схема которой приведена на рис. 1. АС разработана и изготовлена по блочному принципу из стандартных элементов, это позволяет легко производить ее модернизацию и обеспечивает высокие технические и метрологические характеристики при определении ТФС твердых материалов. Исключением в составе АС являются измерительные ячейки № 1 и 2 – это оригинальные устройства, конструкция которых позволяет проводить теплофизический эксперимент в заданном диапазоне температур и давлений. Состав и назначение элементов входящих в АС: 5 – измерительная ячейка № 1, предназначенная для исследования теплофизических свойств резиновых смесей, подверженных влиянию гидростатического давления; 7 – измерительная ячейка № 2, предназначенная для исследования ТФС 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 заданном диапазоне и поддерживать его на постоянном значении в течение всего эксперимента; устройство задания давления 1 для измерительной ячейки № 2, обеспечивающее создание осесимметричной постоянной по величине нагрузки на исследуемый образец; блок согласования 6; персональный компьютер 4.

Измерительная ячейка № 1 (рис. 2) представляет собой массивный цилиндр 2, изготовленный из стали 2Х13, рекомендованной для изготовления аппаратов, работающих под давлением [2]. Внутри цилиндра сделана полость, в которую помещается образец исследуемого материала 3, внутри которого размещены электрический нагреватель и преобразователи температуры.

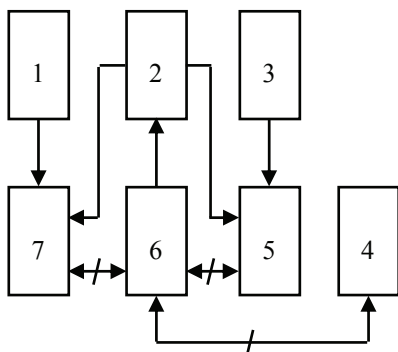


Рис. 1. Структурная схема АС

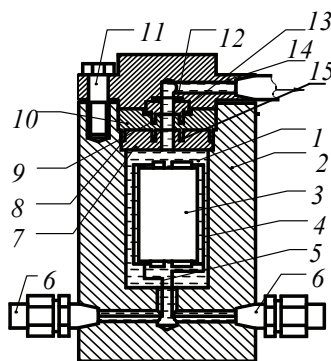


Рис. 2. Измерительная ячейка № 1

В качестве жидкости 1, передающей гидростатическое давление на исследуемый образец, используется трансформаторное масло [2]. В нижней части цилиндра имеются расположенные диаметрально противоположно четыре отверстия, служащие: одно – для присоединения манометра к измерительной ячейке, одно – резервное и два для вводов 6 в измерительную ячейку № 1 термоэлектродных проводников термопар 4 и соединительных проводов 5 для питания нагревателя. Для обеспечения надежной работы измерительной ячейки № 1 и ее герметизации используется устройство с самоуплотняющейся прокладкой. Самоуплотняющиеся прокладки (кольца из маслостойкой резины) 8, 9, 12, 15 подтягиваются при помощи крышки 14, прижимных колец 7, 10 и втулки 13. Крышка крепится к корпусу восьмью болтами 11. Такая конструкция измерительной ячейки и уплотнения ее крышки позволяет проводить эксперименты в диапазоне изменения давления 0...100 МПа.

Измерительная ячейка № 2 состоит из корпуса 1 (рис. 3), 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. 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. Центральное отверстие 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 выбранном сечении образца, 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. Клеммные колодки, с размещенными на них винтами 8, гальванически соединены с термомпар к источнику питания и блоку согласования. Отверстие 10 служит для удаления исследуемого образца из измерительной ячейки. Сверху на исследуемый образец 6 помещается пуансон 5.

Размеры полости в измерительной ячейке № 1 и отверстия в измерительной ячейке № 2 а, следовательно, и размещенных в них образцов исследуемых материалов, обеспечивают соблюдение адекватности математической модели физическому тепловому процессу эксперимента, реализованному в соответствующей измерительной ячейке.

На разработанной АС проведено исследование влияния давления и температуры на ТФС ряда эластомеров: резиновых смесей 51-3064, 7-В-14, 51-1610, вулканизированной резины 7-В-14 и термопластов: полиметилметакрилата, поликарбоната, полипропилена и полиэтилена высокой плотности. На рис. 4 приведена зависимость ТФС резиновой смеси 7-В-14 от температуры и гидростатического давления. На рис. 5 представлена зависимость ТФС полипропилена от температуры и давления осесимметричного сжатия.

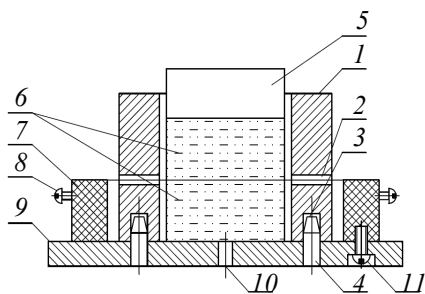


Рис. 3. Измерительная ячейка № 2

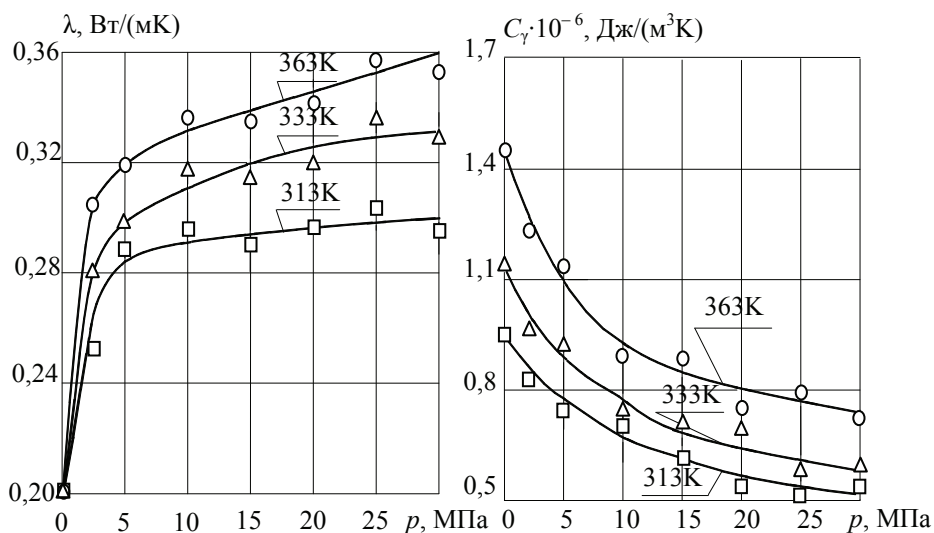


Рис. 4. Теплофизические характеристики резиновой смеси 7-B-14

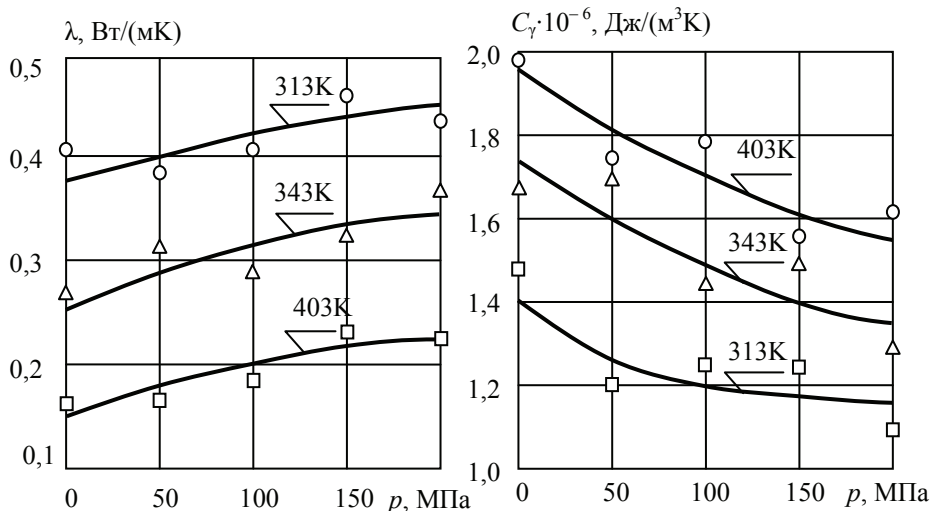


Рис. 5. Теплофизические характеристики полипропилена

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 АС подтверждена также в результате экспериментов на образцовом материале – полиметилметакрилате – в отсутствие давления на образец.

*Список литературы*

1. Акулинин, И.Н. Метод определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления / И.Н. Акулинин, П.С. Беляев, С.В. Мищенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 3. – С. 642–646.

2. Циклис, Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д.С. Циклис. – М. : Химия, 1976. – 431 с.

---

### **Automated System for Determination of Dependencies of Thermal Physical Properties of Solid Polymer Materials on Temperature and Pressure**

I.N. Akulinin<sup>1</sup>, P.S. Belyaev<sup>2</sup>

*Departments: «Electrical Equipment and Automation» (1),  
«Polymer Processing and Packaging» (2), TSTU;  
akulinin-2006@yandex.ru*

**Key words and phrases:** automated system; axis symmetric compression; hydrostatic pressure; measurement cell; polymer materials; temperature; thermal physical properties.

**Abstract:** Automated system for determination of dependencies of thermal physical properties of solid polymer materials on temperature and pressure, description of measurement cell, experiments result are represented.

---

### **Automatisiertes System für die Bestimmung der Abhängigkeit der wärme-physikalischen Eigenschaften der harten Polymerstoffe von der Temperatur und dem Druck**

**Zusammenfassung:** In der Arbeit wird das automatisierte System für die Bestimmung der Abhängigkeit der wärme-physikalischen Eigenschaften der harten Polymerstoffe von der Temperatur und dem Druck vorgeschlagen. Es ist die Beschreibung der Konstruktion der Meßzellen und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen angeführt.

---

### **Système automatisé pour la définition de la dépendance des propriétés thermophysiques des matériaux solides polymères de la température et de la pression**

**Résumé:** Est examiné le système automatisé pour la définition de la dépendance des propriétés thermophysiques (PTP) des matériaux solides polymères de la température et de la pression, est citée la description de la construction des cellules de mesure, sont présentés les résultats des études expérimentales.

---

**Авторы:** *Акулинин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка полимеров и упаковочное производство», проректор по учебно-инновационной деятельности, ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и теплотехника», проректор по социально-воспитательной работе, ГОУ ВПО «ТГТУ».