

УДК. 536. – 036.44

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ**

И.Н. Акулинин¹, П.С. Беляев², С.В. Мищенко³

*Кафедры: «Электрооборудование и автоматизация» (1),
«Переработка полимеров и упаковочное производство» (2),
«Автоматизированные системы и приборы» (3), ТГТУ*

Ключевые слова и фразы: осесимметричное сжатие; полимерные материалы; преобразование Больцмана; температура; теплофизические свойства.

Аннотация: Предложен метод для определения зависимости теплофизических свойств полимерных материалов от температуры и давления, основанный на расчетных зависимостях, полученных из решения нелинейной краевой задачи теплопроводности с использованием преобразования Больцмана.

Обозначения

a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$;	t – время, с;
b_0 – константа, $\text{м}^3/\text{кг}$;	T – температура, К;
C_V – объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;	$T_{\text{пл}}$ – температура плавления, К;
J – механический эквивалент теплоты, $\text{Дж}/\text{калл}$;	T_c – температура стеклования, К;
M – молекулярный вес структурной единицы, Н/моль;	V – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$;
P – давление, МПа;	x – пространственная координата, м;
q_L – линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$;	α – коэффициент линейного расширения, $1/\text{К}$;
q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;	λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.
R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$;	
	Индексы
	н – начальный.

Обработка полимеров давлением в твердом агрегатном состоянии (объемная и листовая штамповка, твердофазная и гидростатическая экструзия, прокатка и т.д.) является одним из перспективных методов [1]. Эти методы не только существенно сокращают время переработки, но и снижают отходы производства при одновременном повышении качества изделий за счет физико-химических процессов, протекающих в перерабатываемом материале при пластическом деформировании под давлением. 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 $T_{\text{пл}}$ – для кристаллизующихся [1].

Для проведения оптимального нагрева перерабатываемых полимеров необходимо располагать информацией о зависимости их теплофизических свойств (ТФС) 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 [1].

Тепловой процесс моделируется краевой задачей теплопроводности для полуограниченного тела, нагреваемого нитяным бесконечным нагревателем известной постоянной мощности, а расчетные зависимости

метода найдены нами из решения обратной нелинейной задачи теплопроводности (ОНЗТ) с помощью преобразования Больцмана [2, 3].

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

Имеются два полуограниченных в тепловом отношении тела 1 и 3 из исследуемого материала, выполненные в виде параллелепипедов, на которые вдоль оси z действует осесимметричная нагрузка P . В плоскости контакта исследуемых тел действует линейный источник 4 постоянной мощности q , совмещенный с измерителем температуры – хромель-копелевой термопарой (на чертеже не показана), термоэлектродные проводники которой выведены с противоположных торцов нагревателя. На расстоянии x_1 от линейного источника 4 параллельно ему расположен термоприемник 2 (хромель-копелевая термопара).

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_n ; мощность линейного источника постоянна при $t \geq 0$; 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 осесимметричного сжатия, описывается краевой задачей [2, 4]:

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

$$t > 0, \quad 0 < x < \infty, \\ T(x, 0) = T_n = \text{const}, \quad (2)$$

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

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

Правая часть уравнения (1) описывает эффекты, возникающие в материале при действии на него внешнего давления [4].

Исследования, проведенные в последнее время показали, что видоизмененное уравнение Ван–Дер–Ваальса [5] не точно описывает экспериментальные дан-

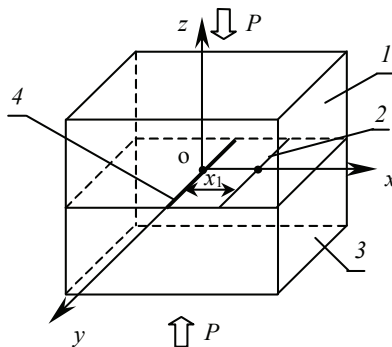


Рис. Физическая модель теплового процесса в методе определения ТФС

ные. Для практических расчетов необходимо ввести поправку на положение «полюса» веера дилатометрических прямых. В этом случае уравнение состояния для твердых полимеров имеет вид [1, 6]

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

где

$$V(T(x,t)) = V_0(1 + 3\alpha(T(x,t) - T_H)); \quad (6)$$

π – внутреннее давление; T_0, b_0 – координаты «полюса» веера дилатометрических прямых.

Уравнение(1) с учетом(5), (6) можно преобразовать к виду

$$C\gamma(T,P)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left[x\lambda(T,P)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] + \frac{3\alpha RT(x,t)\left[\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}[V(T(x,t)) - b_0] - 3\alpha V_0(T(x,t) - T_0)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}\right]}{JM[V(T(x,t)) - b_0]^2}. \quad (8)$$

Краевую задачу (2) – (4), (8) с распределенными параметрами, используя преобразование Больцмана $\xi = \frac{x}{2\sqrt{t}}$, можно свести к задаче с сосредоточенными параметрами:

$$-2\xi\bar{C}\gamma(\xi)\frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}\left[\xi\bar{\lambda}(\xi)\frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi}\right] - \frac{3\alpha R\bar{T}(\xi)\left(-\frac{\xi}{2t}\right)\left[\frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi}[V(\bar{T}(\xi)) - b_0] - 3\alpha V_0(\bar{T}(\xi) - T_0)\frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi}\right]}{JM[V(\bar{T}(\xi)) - b_0]^2}, \quad (9)$$

$$\xi > 0, \quad \bar{T}(\infty) = T_0 = \text{const}, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \left[2\pi\xi\bar{\lambda}(\xi)\frac{d\bar{T}(\xi)}{d\xi}\right] = \frac{\bar{q}_L}{\bar{\lambda}(T,P)}, \quad \bar{q}_L = \text{const}.$$

При этом имеются связи между пространственными и временными производными [2, 3]:

$$\frac{T(x,t)}{\partial x} = -\frac{2t}{x}\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left[x\lambda(T,P)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] = \frac{2t}{x}\frac{\partial q(x,t)}{\partial t}. \quad (11)$$

Из (3), учитывая связь (10), следует

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(2\pi x \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right) = -4\pi t \frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = -\frac{q_L}{\lambda(T,P)}. \quad (12)$$

Откуда получим уравнение для определения теплопроводности в зависимости от температуры и давления

$$\lambda(T, P) = \frac{q_L}{4\pi t \frac{dT(0, t)}{dt}}. \quad (13)$$

При постановке экспериментальных работ определение ТФС проще проводить при постоянном внешнем давлении ($P = P_i = \text{const}$, $i = 1, 2, \dots, n$), определяя на каждом интервале изменения давления температурную зависимость искомых теплофизических характеристик. В этом случае выражение для определения объемной теплоемкости получено из (1) с учетом (11)

$$C\gamma(T)|_{P=P_i} = \frac{2t}{x_1} \frac{dq(x_1, t)}{dt} \bigg/ \frac{dT(x_1, t)}{dt}, \quad (14)$$

где

$$q(x_1, t) = \lambda(T)|_{P=P_i} \frac{2tdT(x_1, t)}{x_1 dt}.$$

Для расчета ТФС полимерных материалов по формулам (13) и (14) необходимо в течение эксперимента измерять температуру на внешней поверхности нагревателя и поверхности $x = x_1$ исследуемого образца, мощность нагревателя и давление P_i .

Данный метод сравнительно просто организуется экспериментально. При этом используются следующие измерительные операции.

1. Две пластины исследуемого полимерного материала вместе с матрицей и пуансоном выдерживаются при постоянной температуре T_n (при необходимости получения данных по ТФС для комнатных температур выдерживание происходит в холодильнике). Для повышения оперативности исследований необходимо иметь набор идентичных матриц и пуансонов.

2. Пластины исследуемого материала помещаются в измерительную ячейку (матрица + пуансон), при этом между ними закладываются растянутые с помощью специальных устройств и расположенные на заданном расстоянии линейный нагреватель с закрепленной на нем термопарой и две термопары, расположенные на расстоянии x_1 от нагревателя и вблизи периферии образца для контроля полуграниченности тела.

3. Измерительная ячейка с испытуемым образцом помещается между плитами гидравлического пресса, нагреватель и термопары коммутируются с измерительной аппаратурой с помощью разъемов.

4. С помощью гидравлического пресса создается заданное давление P_i , осуществляется включение нагревателя и запуск системы контроля температуры и мощности электронагревателя.

5. С помощью платы расширения АЦП типа НВЛ-08, установленной в персональном компьютере, производится регистрация и запись сигналов, снимаемых с блока питания нагревателя и термопар.

6. Термограммы с измерительных преобразователей, расположенных на нагревателе и на расстоянии x_1 , обрабатываются с помощью стандартных процедур, обеспечивающих фильтрацию помех и сглаживание сигналов. Искомые ТФС рассчитываются по формулам (13), (14).

Список литературы

1. Баронин Г.С. Переработка полимеров в твердой фазе / Г.С. Баронин, М.Л. Кербер, Е.В. Минкин, Ю.М. Радько. – М.: Машиностроение – 1, 2002. – 320 с.
2. О решении некоторых задач теплопереноса с помощью подстановки Больцмана / И.Н. Акулинин, В.В. Власов, С.В. Мищенко, А.В. Лопандя // Функ-

ционально-дифференциальные уравнения и краевые задачи математической физики. – Пермь. – 1978. – С. 3-9.

3. Осипова М.Н. Комплексное определение температурной зависимости теплофизических свойств веществ / М.Н. Осипова, В.А. Осипова // Теплоэнергетика. – 1971. – № 6. – С. 84-85.

4. Карлслю Г.К. Теплопроводность твердых тел / Г.К. Карлслю, Д.Е. Егер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1964. – 448 с.

5. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. – М.: Химия, 1974. – 271 с.

6. Уравнение состояния полимерных материалов в твердом агрегатном состоянии / Г.С. Баронин, Ю.М. Радько, Г.Н. Самохвалов, М.Л. Кербер // Пластические массы. – 2001. – № 1. – С. 34 – 36.

Method of Determination of Dependencies of Thermal Physical Properties of Solid Polymer Materials on Temperature and Pressure

I.N. Akulinin¹, P.S. Belyaev², S.V. Mishchenko³

*Departments: “Electrical Equipment and Automation” (1),
“Polymer Processing and Packaging” (2),
“Automated Systems and Devices” (3), TSTU*

Key words and phrases: axis symmetric compression; Boltzman transformation; polymer materials; thermal physical properties.

Abstract: Method for determination dependence of thermal physical properties of polymer materials on temperature and pressure based on calculated dependencies obtained from the solution of non-linear boundary task of heat conduction using Boltzman transformation is discussed.

Methode der Bestimmung der Abhängigkeit der wärme-physikalischen Eigenschaften der harten Polymerstoffe von der Temperatur und dem Druck

Zusammenfassung: In der Arbeit wird die Methode der Bestimmung der Abhängigkeit der wärme-physikalischen Eigenschaften der Polymerstoffe von der Temperatur und dem Druck vorgeschlagen. Diese Methode stützt sich auf die aus Lösung der unlinearen Lokalaufgabe der Wärmeleitfähigkeit mit Benutzung der Boltzmann-Transformation erhaltenen Rechenabhängigkeiten.

Méthode de la détermination de la dépendance des propriétés thermophysiques des corps solides des matériaux polymères de la température et de la pression

Résumé: Dans l'article est proposée la méthode pour la détermination de la dépendance des propriétés thermophysiques des matériaux polymères de la température et de la pression qui est fondée sur les dépendances de calcul reçues à l'aide de la solution du problème non linéaire aux limites du transfert de chaleur avec l'utilisation de la transformation de Boltzmann.