

УДК 536.24.08

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖИДКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ

А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, П.С. Беляев,
М.А. Петрашева, Д.А. Дивина

*Кафедра «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
kafedra@uks.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: измерительное устройство; математическое моделирование; неньютоновские жидкости; нестационарный метод; сдвиговое течение; стационарный метод; температуропроводность; теплоемкость; теплопроводность; физическая модель; численное моделирование.

Аннотация: Разработаны метод и средство измерения для определения зависимости теплофизических характеристик неньютоновских жидких материалов от скорости сдвига. Получены расчетные зависимости, предложена методика измерения. Повышение быстродействия средства измерения доказано экспериментально и с помощью численных расчетов в среде ELCUT.

Обозначения

C_1, \dots, C_4 – постоянные коэффициенты;	T_1, T_2 – температуры во внутреннем цилиндре измерительного устройства и в слое анализируемой жидкости соответственно, К;
$c_x \rho_x$ – объемная теплоемкость исследуемой жидкости, Дж/(м ³ ·К);	V – объем нагревателя внутреннего цилиндра, м ³ ;
l – длина цилиндрического слоя нагревателя, м;	$\lambda_1, \lambda_2 = \lambda_x$ – теплопроводности защитного слоя измерительного устройства и исследуемой жидкости соответственно, Вт/(м·К);
R_1, R_2 – радиусы слоев внутреннего цилиндра измерительного устройства, м;	τ – время, с;
R_3 – внутренний радиус наружного цилиндра, м;	ω – угловая скорость вращения наружного цилиндра, рад/с.

Введение

При сдвиговом течении жидких полимерных материалов происходит изменение их физико-механических свойств, в том числе возникает анизотропия теплофизических и реологических характеристик. По данным, полученным зарубежными исследователями [1, 2], теплопроводность расплавов полиэтилена в направлении, перпендикулярном вектору скорости сдвига, снижается более чем на 20 %. Для сдвигового потока расплава полимерного материала характерно также наличие источника тепла за счет диссипации энергии вязкого трения. Очевидно, что уменьшение теплопроводности в направлении, перпендикулярном сдвигу, приводит к повышению температуры в потоке. Это обстоятельство следует учитывать

при выборе режимов технологических процессов, сопровождающихся сдвиговыми течениями полимерных материалов по каналам различной формы.

Современные методы оптимизации технологических процессов производства изделий из полимерных материалов предполагают использование теплофизических характеристик полимеров в качестве параметров и не учитывают их зависимость от скорости сдвига. В первую очередь это связано со сложностью экспериментального определения данных зависимостей, длительностью измерений, требованиями к высокой квалификации экспериментатора.

В данной статье предлагаются метод и средство измерения, позволяющие значительно снизить длительность теплофизического эксперимента по сравнению с методом, предложенным в [3, 4, 6].

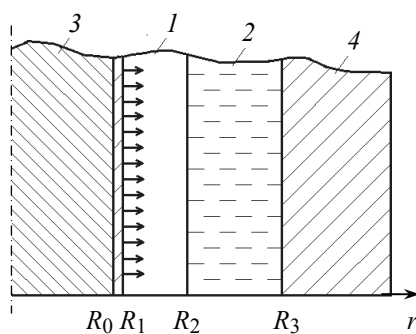


Рис. 1. Схема измерительного устройства

Схема измерительного устройства

Основу измерительного устройства (рис. 1) составляют два коаксиальных цилиндра 3 и 4, между которыми находится исследуемый материал 2 в жидкой фазе. Наружный цилиндр 4 омывается теплоносителем (силиконовым маслом), температура которого поддерживается на заданном уровне термостатом VT-14-02.

Внутренний цилиндр выполнен из термостойкого полимера (полиэфирэфиркетона), в котором под защитным слоем 1 в цилиндрических сечениях радиусом $R_0 = 25$ мм и $R_1 = 26$ мм находятся обмотки из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм, каждая из которых выполняет функции нагревателя и термопреобразователя сопротивления. В ходе теплофизического эксперимента через обмотки пропускают ток, что вызывает их нагрев. Температуры обмоток при этом поддерживаются равными за счет регулирования мощности, подаваемой на внутреннюю обмотку, которая, по сути, является охранным нагревателем. Таким образом, тепловой поток от основного нагревателя идет преимущественно в защитный слой 1, исследуемую жидкость 2 и наружный цилиндр 4.

Метод измерения теплопроводности жидкости заключается в следующем. На первом подготовительном этапе включается термостат, который прокачивает теплоноситель с заданной температурой через теплообменник наружного цилиндра. После того как во всем измерительном устройстве установится стационарное температурное поле, включаются нагреватели, расположенные во внутреннем цилиндре измерительного устройства, и, начиная с этого момента, через равные интервалы времени измеряются значения температуры основного нагревателя, избыточной по отношению к температуре, установившейся в конце первого этапа. Температуры нагревателей поддерживаются равными за счет регулирования мощности, подаваемой на охранный нагреватель.

Постановка обратной задачи теплопроводности и расчетные зависимости

Для аналитического определения теплопроводности жидкости необходимо решить обратную задачу теплопроводности (ОЗТ), включающую в себя дифференциальные уравнения теплопроводности, граничные и дополнительные условия, имеющие вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_1(r)}{dr} \right) = 0, & R_1 < r < R_2; \\ \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_2(r)}{dr} \right) = W(r), & R_2 < r < R_3; \end{cases} \quad (1)$$

граничные условия:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1)}{\partial r} = q_1(R_1) = \frac{U^2}{RS}; \quad (2)$$

$$T_1(R_2) = T_2(R_2), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(R_2)}{\partial r} = \lambda_x \frac{\partial T_2(R_2)}{\partial r}; \quad (3)$$

$$T_2(R_3) = T_0, \quad (4)$$

где $W(r) = m r^{n+1} \left(2\omega \frac{r^{-2/n}}{nr(R_2^{-2/n} - R_3^{-2/n})} \right)^{n+1}$ – функция источника тепла за счет

диссипации энергии вязкого трения исследуемой жидкости [5]; U – напряжение, подаваемое на нагреватель, В; R – сопротивление нагревателя, Ом; m – коэффициент консистенции неньютоновской жидкости, Па·с ^{n} ; n – индекс течения неньютоновской жидкости; S – площадь основного нагревателя, м²; r – радиальная координата.

Дополнительное условие заключается в том, что в эксперименте определяется температура обмотки основного нагревателя, то есть

$$T_1(R_1) = T_3. \quad (5)$$

Общие решения исходных дифференциальных уравнений (1) имеют вид:

$$\begin{cases} T_1(r) = C_1 \ln(r) + C_2, & R_1 < r < R_2; \\ T_2(r) = \frac{n^2 r^{-2/n-1}}{(n+2)^2} m \left[\frac{2\omega}{n(R_2^{-2/n} - R_3^{-2/n})} \right]^{n+1} + C_3 \ln(r) + C_4, & R_2 < r < R_3. \end{cases} \quad (6)$$

Подставляя полученные решения в граничные условия (2)–(4) и дополнительное условие (5) получаем систему из пяти уравнений, решая которую, определяем расчетную зависимость для коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_x = \frac{C_1 \lambda_1}{R_2 \left[\frac{C_3}{R_2} - \frac{\Phi(\omega)(2/n+1)}{R_2^{-2/n+1}} \right]}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(\omega) &= \frac{n^2}{(n+2)^2} m \left[\frac{2\omega}{n(R_2^{-2/n} - R_3^{-2/n})} \right]^{n+1}; \\ C_1 &= -\frac{U^2}{RS} \frac{R_1}{\lambda_1}; \quad C_2 = T_3^* - C_1 \ln(R_1); \\ C_3 &= \frac{-C_1 \ln(R_2) - C_2 - \Phi(\omega) \left(1/R_3^{2/n+1} - 1/R_2^{2/n+1} \right)}{\ln(R_3/R_2)}; \\ C_4 &= \frac{-\Phi(\omega)}{R_3^{2/n+1}} - C_3 \ln(R_3). \end{aligned}$$

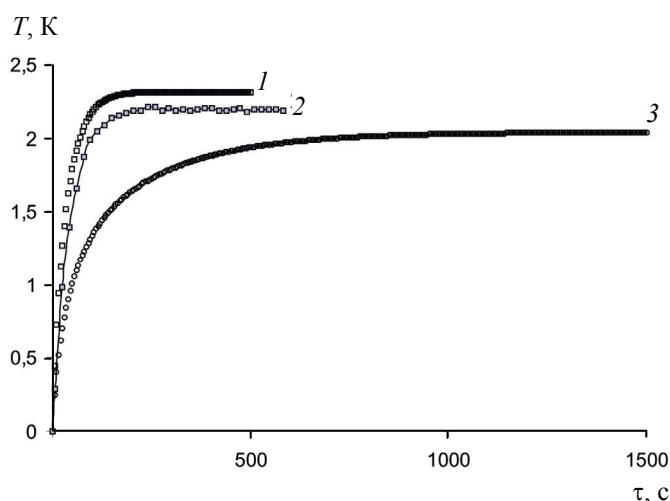


Рис. 2. График зависимости температуры $T(R_1, \tau)$:

1 – с охранным нагревателем (расчет); 2 – с охранным нагревателем (эксперимент);
3 – без охранный нагревателя

В случае отсутствия внутреннего источника тепла $W(r)$ в слое исследуемой жидкости искомое значение теплопроводности находится по формуле

$$\lambda_x = \frac{R_1 U^2 \lambda_1 \ln(R_2/R_3)}{R_1 U^2 \ln(R_1/R_2) - R S T_3 \lambda_1}.$$

Экспериментальные исследования и расчеты

Для проверки эффективности предложенного метода проведены пробные эксперименты и численные расчеты нестационарного температурного поля $T(R_1)$ в среде ELCUT при условии, что исследуемым веществом является этиловый спирт – жидкость, имеющая хорошо известные теплофизические свойства. В расчетах использовались геометрические модели измерительного устройства, соответствующие как схеме, показанной на рис. 1 (с охранным нагревателем), так и схеме, описанной в [3, 7] (без охранный нагревателя). Основные геометрические параметры обеих моделей, а также мощности нагревателей одинаковы.

Полученные в результате расчетов зависимости температуры нагревателя от времени показаны на рис. 2.

Выводы

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что включение в состав измерительного устройства охранный нагревателя, препятствующего оттоку тепла от основного нагревателя внутреннего цилиндра вовнутрь, позволило сократить время активной стадии эксперимента более чем в пять раз, что свидетельствует об эффективности предложенного метода измерения и возможности использования данного устройства для определения теплофизических характеристик нестабильных неньютоновских жидких материалов в условиях сдвигового течения. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными объясняется утечками тепла через торцевые части внутреннего цилиндра.

ра измерительного устройства. Возникающая при этом методическая погрешность (примерно 7 % от измеренного значения) может быть уменьшена за счет введения поправок.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 7.4583.2011 Министерства образования и науки РФ на 2013 г.

Список литературы

1. Wallace, D.J. Shear Dependence of Thermal Conductivity in Polyethylene Melts / D.J. Wallace // *Polym. Eng. Sci.* – 1985. – No. 25. – P. 70–74.
2. Tavman, I.H. An Apparatus for Measuring the Thermal Conductivity and Viscosity of Polymers under Shearing Strain / I.H. Tavman // *Measurement Science and Technology.* – 1997. – No. 8. – P. 287–292.
3. Теоретические и практические основы теплофизических измерений : монография / С.В. Пономарев [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
4. Пономарев, С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. – 248 с.
5. Дивин, А.Г. Методы и средства для определения зависимости теплофизических характеристик жидких полимерных материалов от скорости сдвига и температуры : монография / А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2011. – 160 с.
6. Мищенко, С.В. Метод, устройство и автоматизированная система научных исследований теплофизических свойств жидкостей при сдвиговом течении / С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, А.Г. Дивин // *Приборы и системы управления.* – 1992. – № 10. – С. 18–19.
7. Мищенко, С.В. Методика и автоматизированная аппаратура для исследования теплофизических свойств жидких ламинарно-текущих полимеров / С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, А.Г. Дивин // *Измер. техника.* – 1992. – № 11. – С. 37–39.

Method of Determining Thermo-Physical Properties of Liquid Polymer Materials under Shear Flow

**A.G. Divin, S.V. Ponomarev, P.S. Belyaev,
M.A. Petrasheva, D.A. Divina**

*Department “Quality Management and Certification”, TSTU;
kafedra@uks.tstu.ru*

Key words and phrases: mathematical modeling; measuring device; non-Newtonian fluid; numerical modeling; physical model; shear flow; specific heat; steady-state method; thermal conductivity; thermal diffusivity; transient method.

Abstract: The paper develops a method and a measuring device to determine the dependence of thermal properties of non-Newtonian liquids on the shear rate. The calculated dependencies are obtained, the method of measuring is proposed. The performance improvement of the measuring device is proved experimentally and by numerical calculations in ELCUT.

Methode der Bestimmung der wärmephysikalischen Charakteristiken der flüssigen Polymermaterialien bei der Schiebeströmung

Zusammenfassung: Es sind die Methode und das Mittel der Messung für die Bestimmung der Abhängigkeit der wärmephysikalischen Charakteristiken der nichtnewtonischen flüssigen Materialien von der Geschwindigkeit der Verschiebung entwickelt. Es sind die Rechenabhängigkeiten erhalten, es ist die Methodik der Messung angeboten. Die Erhöhung der Schnelligkeit des Mittels der Messung ist experimentell und mit Hilfe der numerischen Berechnungen im Kreis ELCUT bewiesen.

Méthode de la détermination des caractéristiques thermophysiques des matériaux polymères sous l'écoulement de décalage

Résumé: Sont élaborés la méthode et le moyen de la mesure pour la détermination de la dépendance des caractéristiques thermophysiques des matériaux non newtoniens liquides de la vitesse du décalage. Sont reçues les dépendances de calcul, est proposée la méthode de mesure. L'augmentation de la rapidité de la mesure est prouvée expérimentalement et à l'aide des calculs dans le milieu ELCUT.

Авторы: *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Управление качеством и сертификация»; *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Беляев Павел Сергеевич* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Петрашева Мария Александровна* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Дивина Дарья Александровна* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
