



**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ**

**ТАМБОВ 2004**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Город Тамбов является традиционным местом проведения теплофизических школ, известных широкому кругу ученых России и ближнего зарубежья.

Теплофизические школы являются традиционной формой обмена информацией о последних достижениях в области изучения теплофизических свойств веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях; в разработке методов и устройств для исследования теплофизических свойств; способствуют повышению уровня теоретических и экспериментальных теплофизических исследований, внедрению в практику современных методик и измерительных средств.

Первая (1971), вторая (1973), третья (1975), девятая (1988), десятая (1990) Всесоюзные теплофизические школы проводились на базе Тамбовского института химического машиностроения, преобразованного в 1993 г. в Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ). В 1977–85 гг. теплофизические школы проводились в Одессе, Алма-Ате и других городах.

Начиная с 1992 г. теплофизическая школа приобрела статус Международной. Первая, Вторая, Третья и Четвертая международные теплофизические школы были проведены в г. Тамбове на базе ТГТУ в период с 21 по 24 сентября 1992 г., с 25 по 30 сентября 1995 г., с 19 по 22 октября 1998 г. и с 24 по 28 сентября 2001 г.

Пятая международная теплофизическая школа, посвященная проблемам автоматизации теплофизического эксперимента, автоматизированным экспериментальным установкам и приборам, метрологии, стандартизации и управлению качеством, а также современным энергосберегающим тепловым технологиям, сушке и термовлажностной обработке материалов, будет также проводиться в г. Тамбове с 20 по 24 сентября 2004 г. Во время ее работы планируется провести выставку теплофизических приборов и программных средств.

Предлагаемый вашему вниманию сборник материалов содержит результаты современных исследований теплофизических свойств веществ, разработки теплофизических приборов и средств измерений при контроле и управлении качеством, а также результаты исследований в области энергосберегающих технологий, сушке и термовлажностной обработке материалов.

## PREFACE

Tambov is known among the wide number of scientist in the field of thermophysics to be the traditional place where the Thermophysical Schools are taking place.

Thermophysical schools have conventional form of information exchange about the latest achievements in area of substances thermophysical properties investigations in solid, liquid and gaseous states, in the development of methods and devices for the investigations of thermophysical properties. Thermophysical schools promote the raise of the level of theoretical and experimental thermophysical investigations. These schools introduce modern procedures and measuring devices.

The first (1971), the second (1973), the third (1975), the ninth (1988), the tenth (1990) All-Union thermophysical schools were held on the base of Tambov Institute of Chemical Engineering transformed into Tambov State Technical University (TSTU) in 1993. Thermophysical schools were held in Odessa, Alma-Ata and in other places in 1977-1985.

Since 1992 the thermophysical school has received International status. The First, The Second and The Third International Thermophysical Schools were held in Tambov (TSTU) in the periods 21-24 September, 1992, 25-30 September, 1995 and 19-22 October, 1998 respectively.

The Fifth International Thermophysical School devoted to the problems in the automation of the thermophysical experiment, automated measuring devices in metrology, standardization and quality control as well as energy-saving heat technologies, drying and heat humid processing of materials, will be also held in Tambov during the period from 20<sup>th</sup> till 24<sup>th</sup> of September, 2004. An exhibition of thermophysical devices, hardware and software is included in the schedule of the school.

The book of proceeding contains results of substance thermophysical properties research, examples of designing thermophysical devices and measurement systems when carrying out quality control and management as well as research results in the field of energy-saving technologies, drying and heat humid processing of materials.

---

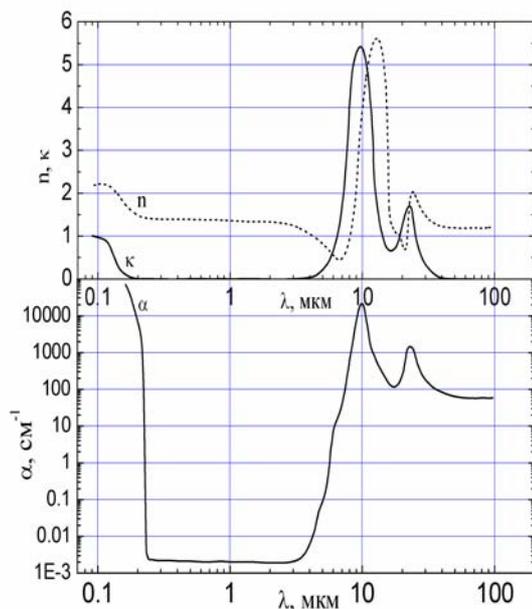
*В.К. Битюков, В.А. Петров, В.В. Терешин*

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)»

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

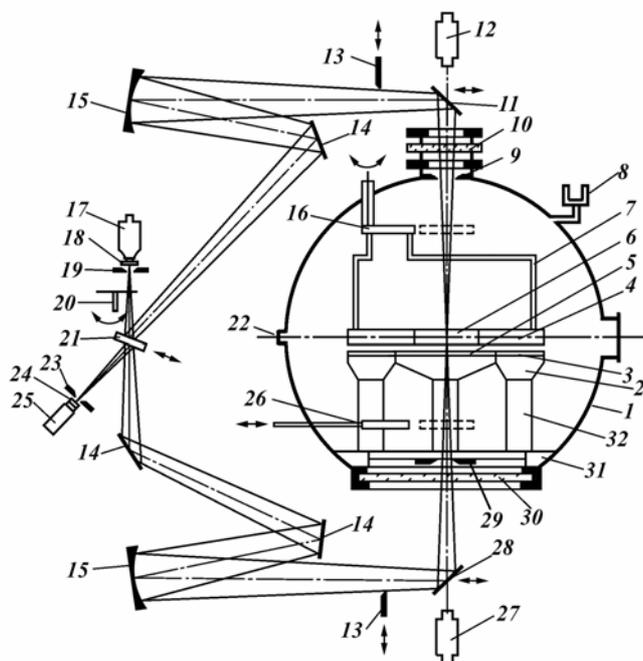
Перенос энергии в твердых материалах обычно осуществляется теплопроводностью. Однако есть материалы, где не меньшую роль играет перенос энергии излучением. Эти материалы относят к классу полупрозрачных для теплового излучения материалов (ППМ) [1, 2]. В определенных областях спектра теплового излучения они имеют малый коэффициент поглощения  $k$  и пропускают падающее на них или собственное излучение на значительные расстояния. К частично прозрачным материалам относятся стекла, кристаллы, диэлектрики и полупроводники, а также большинство органических веществ. Качественный характер изменения коэффициента  $\alpha$  (показателя  $k$ ) поглощения, а также показателя преломления  $n$  для типичного ППМ в области длин волн  $\lambda$ , где сосредоточена большая часть энергии теплового излучения при температурах  $T$  выше комнатной, т.е. в интервале длин волн от ближнего ультрафиолета до, примерно, 100 мкм, показан на рис. 1. Подробное объяснение спектральной зависимости вышеназванных параметров приведено в [2].

Процедура определения коэффициента теплопроводности  $\Lambda$  полупрозрачных материалов в условиях радиационно-кондуктивного переноса энергии (РКПЭ), например, стационарным методом плоского слоя [1–3] представляет собой триединую задачу.



**Рис. 1** Спектральная зависимость показателя поглощения  $k$ , показателя преломления  $n$  и коэффициента поглощения  $\alpha$  типичного полупрозрачного материала

Первая задача состоит в создании экспериментального рабочего участка нагреватель – исследуемый образец ППМ – холодильник с известными и стабильными во времени оптическими свойствами, с помощью которого и определяются необходимые экспериментальные параметры РКПЭ. Для метода плоского слоя с контактными границами [1] такими параметрами являются перепад температуры  $\Delta T$  на образце толщиной  $H$ , плотность суммарного теплового потока  $Q$  в образце и температура  $T_0$  одной из поверхностей образца. Для метода плоского слоя с бесконтактными границами такими параметрами являются, например, температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ , а также  $\Delta T$  на образце. Схема установки для измерения коэффициента теплопроводности бесконтактным методом плоского слоя приведена на рис. 2.



**Рис. 2** Схема установки для измерения коэффициента теплопроводности полупрозрачных материалов бесконтактным методом:

1 – корпус вакуумной камеры; 2 – съемный токоподвод; 3 – охранный нагреватель; 4 – охранный пластина; 5 – центральный нагреватель;  
 6 – исследуемый образец; 7 – молибденовая подвеска; 8 – датчики вакуума; 9, 29 – диафрагмы; 10, 30 – окна из фторида кальция;  
 11, 14, 21, 28 – плоские зеркала; 12 – инфракрасный монохроматический пирометр Optitherm 12-8700 фирмы Barnes Engineering Company; 13 – регулируемые задвижки; 15 – сферические зеркала; 16, 26 – водоохлаждаемые экраны; 17 – приемник инфракрасного излучения; 18 – интерференционный инфракрасный фильтр; 19, 23 – диафрагмы; 20 – модулятор; 22 – уплотнение для ввода термопар; 24 – интерференционный фильтр на  $\lambda = 0,65$  мкм; 25 – приемник излучения на  $\lambda = 0,65$  мкм; 27 – оптический пирометр ЭОП-66; 31 – дно камеры; 32 – неподвижные токовводы

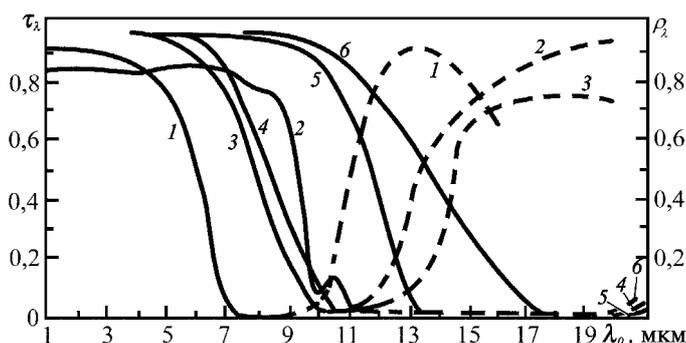
Одна из самых серьезных проблем при реализации этой установки связана с измерением перепада температуры на образце ППМ, отделенного вакуумными зазорами от нагревателя и холодильника. Для этого был предложен и реализован метод определения малых разностей ( $\Delta T \sim 30 \dots 50$  К) высоких температур ( $T \sim 1000 \dots 1500$  К) с погрешностью 2,4 ... 3,7 % [4, 5]. Он основан на том факте, что в специфике спектральных зависимостей оптических свойств ППМ скрыта возможность их пирометрии. Известно, что отражательная способность  $R$  оптически гладкой поверхности ППМ в направлении нормали может быть записана в виде

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}. \quad (1)$$

В соответствии с формулой (1) отражательная способность ППМ практически равна нулю, если показатель преломления  $n=1$ , а квадрат показателя поглощения удовлетворяет неравенству  $\kappa^2 \ll (n+1)^2$ . В то же время для измерения температуры именно поверхности величина  $\kappa$  должна быть такой, чтобы излучение выходило из достаточно тонкого приповерхностного слоя, т.е. этот слой был бы оптически бесконечным, и его излучение соответствовало бы излучению абсолютно черного тела.

Таким образом, температура поверхности полупрозрачных материалов, а точнее температура тонкого слоя, расположенного вблизи поверхности, может быть измерена теми же методами, что и для непрозрачных материалов, если использовать такую область спектра, чтобы коэффициент поглощения был бы достаточно велик ( $10^2 \dots 10^3$  см<sup>-1</sup>) и показатель преломления был близок к единице. В этом случае приповерхностный слой толщиной  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  см был бы уже оптически бесконечным, отражательная способность поверхности была бы мала, а излучательная способность была бы близка к единице. Такая область спектра может быть найдена на коротковолновом крае первой полосы поглощения на колебаниях атомов в решетке.

На рис. 3 в качестве примера представлен ряд данных по пропускательной и отражательной способности некоторых монокристаллов при комнатной температуре. На основе этих данных могут быть выбраны спектральные диапазоны работы пирометра для измерения температуры их поверхности.



**Рис. 3 Пропускательная способность  $\tau_\lambda$  некоторых монокристаллов различной толщины (сплошные линии) и отражательная способность их поверхности  $\rho_\lambda$  (штриховые линии):**

*1 – лейкосапфир (L=1 мм); 2 – MgO (0,408 мм); 3 – LiF (1 мм); 4 – CaF<sub>2</sub> (1 мм); 5 – BaF<sub>2</sub> (9 мм); 6 – NaF (1 мм)*

Реально эти диапазоны будут несколько зауженными по сравнению с диапазоном, который может быть использован при высоких температурах, так как край полосы поглощения с ростом температуры смещается в коротковолновую область. Границы выбранного таким образом интервала длин волн представлены в таблице. В этой же таблице приведены значения начала и конца этого спектрального интервала, а также отражательная способность поверхности.

Спектральные интервалы  $\Delta\lambda_0 = \lambda_{02} - \lambda_{01}$ , пригодные для измерения температуры поверхности полупрозрачных для теплового излучения материалов

Материал	$\lambda_{01}$ , мкм	$\lambda_{02}$ , мкм	$\Delta\lambda_0$ , мкм	Отражательная способность, $\rho_{\lambda n}$
Кварцевое стекло	4,8	7,6	2,8	0,04 ... 0,01
Лейкосапфир	7,3	10,2	2,9	0,04 ... 0,025
Оксид магния	11,5	12,3	0,8	0,05
Фторид лития	9,8	12,2	2,4	0,02 ... 0,04
Фторид кальция	11,2	15,0	3,8	0,030 ... 0,015
Фторид бария	13,4	23,0	9,6	0,03
Фторид натрия	16,3	18,4	2,1	0,03

Из таблицы видно, что ширина пригодного для пирометрии полупрозрачных для теплового излучения материалов спектрального интервала  $\Delta\lambda_0$ , в котором выполняются условия оптической непрозрачности и малости отражения поверхности, составляет в среднем 2,5 ... 4,5 мкм, что достаточно для получения удовлетворительного сигнала пирометра.

Подробно результаты численного моделирования обратной задачи (ОЗТ) в условиях РКПЭ с целью выбора параметров, необходимых для решения для определения коэффициента теплопроводности оптического кварцевого стекла с минимальной погрешностью, рассмотрены в [3].

Вторая задача определения  $\Lambda$  ППМ в условиях РКПЭ – это выбор данных о спектральной, угловой и температурной зависимостях оптических свойств исследуемого ППМ и ограничивающих его поверхностей. Причем это следует выполнять с учетом характера отражения (зеркальный, диффузный или комбинированный). Для метода плоского слоя с контактными границами необходима информация об оптических свойствах рабочего участка в спектральном интервале частичной прозрачности исследуемого материала (для оптического кварцевого стекла – это  $\lambda \sim 0,4 \dots 4,8$  мкм), а для метода плоского слоя с бесконтактными границами – в спектральном интервале, определяющем радиационный перенос энергии (для оптического кварцевого стекла – это  $\lambda \sim 0,4 \dots 100$  мкм). Выбор оптических свойств для вольфрамового нагревателя, черного холодильника и оптического кварцевого стекла, использованных в установке, приведенной на рис. 2, изложен в [2, 6]. Особо следует отметить необходимость в аппроксимации по температуре соответствующих данных для узлов дискретизации численного интегрирования по длине волны. Полученные аналитические соотношения позволили в итерационном цикле вычислить соответствующий параметр при конкретной температуре материала.

Третья задача определения  $\Lambda$  ППМ в условиях РКПЭ представляет собой непосредственное вычисление искомого значения коэффициента теплопроводности, т.е. решение ОЗТ в условиях РКПЭ, выполняемое только численными методами.

Стационарный перенос энергии в плоском слое толщиной  $H$  полупрозрачного материала определяется уравнениями переноса излучения и сохранения энергии, записанными для спектральных интенсивностей излучения вперед  $I_v^+$  и назад  $I_v^-$ ,

$$\mu \frac{dI_v^+}{dx} = -\tau_v I_v^+ + \tau_v n_v^2 I_v^P, \quad (2)$$

$$\mu \frac{dI_v^-}{dx} = -\tau_v I_v^- + \tau_v n_v^2 I_v^P, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left[ -\frac{\Lambda}{l} \frac{dT}{dx} + 2\pi \int_{(v)0}^1 (I_v^+ - I_v^-) \mu d\mu dv \right] = 0. \quad (4)$$

В этих уравнениях  $l = H/2$  – полутолщина плоского слоя;  $x$  – безразмерная координата точки в слое ( $x \in [-1, 1]$ );  $\mu = |\cos \psi|$ ;  $\psi$  – угол, отсчитываемый от положительного направления оси  $X$ ;  $\tau_v = \alpha_v l$  – оптическая толщина;  $I_v^P$  – интенсивность равновесного излучения в вакууме.

Интегрирование в уравнении (4) ведется по области полупрозрачности ( $v$ ), т.е. по тем частотам, которым соответствует не слишком большой коэффициент поглощения, чтобы понятие интенсивности излучения не теряло смысла.

Граничные условия для уравнений переноса излучения (2) и (3) имеют вид

$$I_v^{+(-)} = (1 - R_{1(2),v}) n_v^2 I_{vH(x)}^P + R_{1(2),v} I_v^{-(+)}; \quad x = -(+)l, \quad (5)$$

где

$$R_{1(2),v}(\mu) = 1 - \frac{[1 - R_{H(x),v}(\mu')][1 - R_v(\mu)]}{1 - R_{H(x),v}(\mu') R_v(\mu)}. \quad (6)$$

Коэффициенты отражения нагревателя  $R_{H,v}$ , холодильника  $R_{x,v}$  и границы материал – зазор  $R_v$  определяются через соответствующие оптические свойства по формулам Френеля. Значения  $\mu'$  ( $0 \leq \mu' \leq 1$ ) связаны со значениями  $\mu$  законом Снелла  $(\mu')^2 = 1 - n_v^2(1 - \mu^2)$  для значений  $\mu$ , больших косинуса угла полного внутреннего отражения, т.е. при  $\mu > \mu_{п.в.} = \sqrt{1 - (1/n_v^2)}$ . При  $\mu \leq \mu_{п.в.}$  очевидно, что  $R_{1,v} = R_{2,v} = R_v = 1$ . Следует отметить, что  $R_{1(2),v}$  имеет смысл эффективного (с учетом многократных отражений) коэффициента отражения зазора, а второй член в правой части уравнения (6) является эффективной излучательной способностью  $\varepsilon_{1(2),v}$  нагревателя (холодильника). Согласно закону Кирхгофа  $\varepsilon_{1(2),v} + R_{1(2),v} = 1$ .

Граничные условия для уравнения энергии (4) имеют вид

$$\Delta T = T(-1) - T(+1) \quad (7)$$

и

$$\begin{aligned} -\frac{\Lambda}{l} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\mp 1} &= \pm \pi \int_{(\tilde{v})} \varepsilon_{h,v1(2)} [I_{H(x),v}^P - I_v^P(\mp 1)] dv \pm \\ &\pm \frac{\Lambda_{1(2)}}{\delta_{1(2)}} [T_{H(x)} - T(\mp 1)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{h,v1(2)} = 2 \int_0^1 [1 - R_{H(x),v}] (1 - R_v) / (1 - R_{H(x),v} R_v) d\mu$  – эффективная спектральная полусферическая излучательная способность;  $\Lambda_{1(2)}$  и  $\delta_{1(2)}$  – коэффициенты теплопроводности и толщины зазоров, соответственно.

Интегрирование в уравнении (8) ведется по области непрозрачности ( $\tilde{v}$ ), т.е. по тем частотам, которые не вошли в область полупрозрачности.

В качестве дополнительного условия (7) в этом методе был использован экспериментально измеряемый перепад температуры  $\Delta T$  на плоском слое ППМ.

В результате решения приведенной выше системы уравнений (1) – (3) получено интегральное уравнение, определяющее поле температур в плоском слое

$$T(x) = T(-1) - \frac{Ql(1+x)}{\Lambda} + \frac{2\pi l}{\Lambda} \int_{(v)} n_v^2 \left\{ \int_{-1}^1 [G_v(-1, \xi) \times [I_v^P(\xi) - I_v^P(-1)] - G_v(x, \xi) [I_v^P(\xi) - I_v^P(x)]] d\xi + \Gamma_v(-1) I_v^P(-1) - \Gamma_v(x) I_v^P(x) \right\} dv + \frac{2\pi l}{\Lambda} \int_{(v)} n_v^2 \int_0^1 [[G_{1,v,\mu}(-1) - G_{1,v,\mu}(x)] \times I_v^P(T_H) + [G_{2,v,\mu}(-1) - G_{2,v,\mu}(x)] I_v^P(T_x)] d\mu dv, \quad (9)$$

где  $G_v(x, \xi) = \int_0^1 \frac{\mu}{\beta_v} \{ \beta_v e^{-\gamma_v |x-\xi|} + R_{1,v}^* e^{-\gamma_v(2+x+\xi)} + R_{2,v}^* e^{-\gamma_v(2-x-\xi)} + R_{1,v}^* R_{2,v}^* [e^{-\gamma_v(4+x-\xi)} + e^{-\gamma_v(4-x+\xi)}] \} d\mu$ ;

$$G_{1,v,\mu}(x) = \frac{\mu}{\gamma_v \beta_v} (1 - R_{1,v}^*) [e^{-\gamma_v(1+x)} + R_{2,v}^* e^{-\gamma_v(3-x)}];$$

$$G_{2,v,\mu}(x) = \frac{\mu}{\gamma_v \beta_v} (1 - R_{2,v}^*) [e^{-\gamma_v(1-x)} + R_{1,v}^* e^{-\gamma_v(3+x)}];$$

$$\Gamma_v(x) = \int_{-1}^1 G_v(x, \xi) d\xi; \quad \gamma_v = \frac{\alpha_v l}{\mu}; \quad \beta_v = 1 - R_{1,v}^* R_{2,v}^* e^{-4\gamma_v};$$

$\xi$ , так же, как и  $x$ , безразмерная координата точки в слое ( $\xi \in [-1, 1]$ );  $Q$  – константа интегрирования, имеющая смысл плотности полного теплового потока.

Уравнение (9) дискретизировалось по координате, углу и частоте. В результате дискретизации по координате получалась система из  $m_x - 1$  уравнений ( $m_x$  – число узлов дискретизации по координате; при  $x = -1$  уравнение (9) обращается в тождество) с  $m_x + 2$  неизвестными ( $\Lambda, T_i, I = 1, 2, 3, \dots, m_x$ ). Тремя дополнительными уравнениями к уравнению (9) являются выражение (7) для перепада температуры на образце ППМ и граничные условия (8). Однако с точки зрения уменьшения погрешности решения ОЗТ целесообразно заменить одно из граничных условий (8), а именно, условие теплообмена в зазоре между «холодной» поверхностью материала и холодильником, на экспериментально измеренное значение температуры «холодной» поверхности материала (рис. 2). Представленная выше система уравнений была решена численным методом.

Для оптического кварцевого стекла была реализована рассмотренная методология. Полученные результаты позволили сформулировать рекомендуемые значения коэффициента теплопроводности оптического кварцевого стекла для интервала температур  $600 \text{ К} < T < 1500 \text{ К}$ :

$$\lambda = 0,27698 + 0,00574T - 9,33005 \cdot 10^{-6} T^2 + 7,26615 \cdot 10^{-9} T^3 - 1,84084 \cdot 10^{-12} T^4,$$

где  $\lambda$  – в Вт/(м·К), а  $T$  – в К [7].

### Список литературы

1. Сергеев О.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов / О.А. Сергеев, А.А. Мень. М.: Изд-во стандартов, 1977. 228 с.
2. Битюков В.К. Контроль теплового состояния изделий радиоэлектроники из полупрозрачных материалов / В.К. Битюков, В.А. Петров. М.: МИРЭА, 2000. 187 с.

3. Битюков В.К. Теоретические основы бесконтактного метода определения коэффициента теплопроводности частично прозрачных материалов / В.К. Битюков, В.А. Петров, С.В. Степанов // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 4. С. 849 – 856.

4. А.с. 748148 СССР, МКИ<sup>2</sup>G01J5/08. Способ измерения перепада температур на слое полупрозрачного материала и устройство для его осуществления / В.К. Битюков, В.А. Петров, В.Ю. Резник, С.В. Степанов (СССР). 4 с.: ил.

5. Битюков В.К. Метод измерения малых разностей высоких температур на плоском слое частично прозрачного материала / В.К. Битюков, В.А. Петров, Ю.К. Лингарт // Электротехническая промышленность. Сер. «Электротермия». 1979. Вып. 7 (203). С. 6 – 8.

6. Битюков В.К. Определение теплопроводности кварцевого стекла бесконтактным методом плоского слоя при температурах 900-1500 К / В.К. Битюков, В.А. Петров, С.В. Степанов // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21, № 6. С. 1106 – 1114.

7. Битюков В.К. Оптическое кварцевое стекло как эталонное вещество коэффициента теплопроводности частично прозрачных материалов / В.К. Битюков, В.А. Петров // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38, №2. С. 313 – 320.

***Б.В. Бойцов***

Московский государственный авиационный институт

## **КАЧЕСТВО ЖИЗНИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Информационная революция привела к тому, что экспорт технологий, продуктом которых раньше был товар, стал переориентироваться на культуру. При этом в стране-экспортере остается производство новых технологий и принципов управления, а за рубежом, в осваиваемые страны, теперь переносится не только экологически грязное, но и интеллектуально грязное производство. Таким образом, страна-экспортер обеспечивает себе необходимое качество жизни, а заодно и необходимый характер мышления у потребителей технологий. Информационные технологии несут на себе отпечаток культуры страны-производителя, поэтому, осуществляя культурную экспансию, они автоматически обеспечивают себе конкурентное преимущество, потому что самым верным способом ослабить сопротивление является распространение своей культуры в обществах, относящихся к другим типам культур. Если сейчас универсальным эквивалентом, выражением господства, благосостояния и представителем овеществленной жизненной силы являются деньги, то в будущем их место могут занять технологии. Огромные суммы тратятся на процесс перекачки интеллектуального потенциала от вторых к первым.

Мир вступает в эпоху, когда борьба ведется не за источники сырья и рынка сбыта, а за сознание человека, как за основной инструмент создания стоимости. Информационные технологии создали все увеличивающийся разрыв между теми, кто способен их создавать и странами-потребителями.

Квинтэссенция сегодняшнего дня заключается в глубоком переломе, который Россия переживает особенно мучительно. Стоит задача изменения национального менталитета. Без этого нет будущего. Совершается переход от духовного в потребительское пространство. Конечно, легче всего переходить постепенно, когда не лимитировало бы время, не нужно было бы никого догонять. Перед Россией же стоит задача изменения национального менталитета. Без этого нет будущего.

Из истории нашего государства хорошо известно, что контакты с Европой и мировым пространством сопровождались, как правило, сложными кризисными явлениями, потрясениями, ломкой политических и национальных иллюзий. Великий русский философ А.И. Ильин в книге «О грядущем России», говоря о духовной инерции русского народа, привел пример из нашей истории: «Петру Великому пришлось вломиться в это самочувствие и заставить русских людей учиться необходимому. Он понял, что народ, отставший в цивилизации, в технике, в знании – будет завоеван и поработен, и не отстоит себя и свою правую веру».

Говоря о ментальности нации, следует отметить, что от качества образования зависит решение многих проблем во всех сферах жизни общества. Будущее того или иного народа, государства в первую очередь зависит от того, насколько, и, главное как решаются вопросы образования.

Изменение ментальности можно наблюдать уже сейчас. Так, в России всегда повторяли, что культура – духовная потребность науки. Сегодня она мало-помалу становится частью потребительских ус-

луг. Чтобы понять разницу, достаточно взглянуть на Америку, где культура вошла в сферу потребительских услуг уже давно.

Каждый человек, привнося в общественное сознание свою лепту, участвует в формировании менталитета нации. Следовательно, чем интеллектуально богаче и нравственно совершеннее будет каждый член общества, тем более перспектив у нации обеспечить себе достойное качество жизни.

В работе ведущего представителя западной социальной философии М. Вебера «Протестантская этика и дух капитализма» подчеркивается значение менталитета, как основы экономического успеха.

Развивая эту идею, Н.А. Бердяев утверждает, «что если народы хотят духовно возродиться, то им придется вступить на путь аскетического самоограничения и одухотворения хозяйственной жизни».

Двадцатый век дал ряд примеров изменения национального менталитета: это Япония, Корея, Тайвань, Китай, Испания, Ирландия, Португалия.

Как сохранить в этих условиях самобытность российской культуры, объединяющую духовность многоконфессиональной страны, дающую терпимость и выносливость населения в сложнейших условиях? Весьма сложная задача.

Перед Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Правительство России поставило важнейшие задачи по развитию нашей страны. В сегодняшних условиях задача Академии Проблем качества консолидировать научную общественность и наладить теснейшие контакты с Федеральным агентством. Гарантией является глубокое понимание руководителем Федерального агентства Г.И. Элькиным значения научно-общественной составляющей.

Для эффективной работы необходим координирующий орган во главе с руководителем Федерального агентства. Таким образом, будет создана государственная научно-общественная структура подготовки и сопровождения вопросов в условиях динамического и скачкообразного развития нашей страны.

Президентом В.В. Путиным поставлены конкретные задачи и определены направления деятельности. Предстоит трудная, однако, принципиальная работа по развитию нашей страны и обеспечения достойного качества жизни для всех нас.

*Н.Ц. Гатапова, В.И. Коновалов*

Тамбовский государственный технический университет

## **МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ С СУЩЕСТВЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КИНЕТИКОЙ**

### **1 РАЗВЕДОЧНЫЕ И ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

Проблемам методологии экспериментов и вопросам обработки экспериментальных данных посвящено море литературы в разных областях знаний. Настоящий доклад посвящен методологии экспериментальных исследований в обширной, но конкретной области – процессов и аппаратов химической технологии, прежде всего, в процессах сушки и термообработки. Естественно, в докладе мы будем касаться ряда общих вопросов и дадим по ним некоторые оценочные соображения из наших многолетних наблюдений (см., например, [1, 2]), приводя также необходимые для их пояснения фрагменты практических примеров для разнообразных процессов (см., например, [3]). Основной же материал доклада посвящен рассмотрению представленной в [4] комплексной методологии исследований процессов сушки и тепловой обработки обширнейшей группы материалов, для которых кинетика нагрева имеет такое же существенное значение, как кинетика собственно сушки, т.е. удаления влаги. Эти работы были начаты еще в 1960-х гг. во ВНИИРТмаше и ТИХМе применительно к волокнистым кордным материалам резинотехники (некоторые итоги первоначального периода см., например, в [5 – 7]). В настоящее время рассматриваемые материалы и разработанная комплексная методология охватывают почти все основные группы высушиваемых материалов с существенной температурной кинетикой

## 1 Разведочные и подтверждающие исследования и эксперименты

В процессах и аппаратах, как и во многих других науках, одинаково важны и проводятся часто параллельно «разведочные» и «подтверждающие» эксперименты и их обработка (по терминологии Дж. Тьюки [15]: «Exploratory Data Analysis» и «Confirming Data Analysis»). В связи с феноменом всеобщей компьютеризации и опасностью гипертрофированной формализации значение так называемых «разведочных» работ (поисковых, качественных, ставящих целью изучение внутренней природы и механизма явления, часто интуитивных, эвристических) в этих условиях принципиально возрастает. Задачи «подтверждающих» экспериментов (количественных, процедурных, ставящих целью получение численных результатов и соотношений) чаще удается формализовать, хотя тоже далеко не всегда, так как методы измерений при исследовании сколько-нибудь сложных процессов также носят творческий характер и опираются на теоретический анализ (см., например, [16]). Здесь уместно привести слова выдающегося теоретика К. Труделла: «Философы, рассуждающие о науке, часто говорят нам, что в ее основе лежит эксперимент. Но знали бы они, насколько проще сказать так, нежели нечто действительно важное измерить правильно» (*цитир. по А.Я. Малкину*).

Творческая сторона методологии экспериментов продолжает интенсивно разрабатываться. Стоит указать книгу Л.Б. Христенсена [17], выдержавшую в США девять изданий (с 1977 по 2004 гг.), к сожалению, трудно доступную сейчас в России. Однако близкая к ней монография Р. Готтсданкера [18] по методологии психологического эксперимента имеется в хорошем русском переводе с дополнениями. Именно работы в области экспериментальной психологии, пожалуй, наиболее корректно характеризуют творческую сторону методологических проблем любого эксперимента. Имеется также ряд весьма полезных для исследователя работ по особенностям творческого процесса [19], в том числе с попытками его прагматической «алгоритмизации» (точнее, приемов ускорения решения творческих задач; например, работы Диксона, Гарднера, Альтшулера и др.) или научного анализа [20, 21]. Особо широко сейчас ведутся работы по разным направлениям проблемы «искусственного интеллекта», прежде всего, в связи с компьютеризацией и информатизацией, в том числе коммерческой.

Первичной проблемой как «разведочных», так и «подтверждающих» экспериментов на практике, естественно, является выбор «правильных» направления, плана, техники и методики исследований. «Правильность» включает множество критериев. Для разведочных экспериментов, прежде всего, необходима правильная гипотеза о возможных механизмах явления. Часто может быть несколько альтернативных или смешанных гипотез. Для построения правильной гипотезы нужно владение всем имеющимся в данной области материалом, а главное – его творческий анализ. Уместно снова подчеркнуть, что никакая компьютеризация или «...отработка экспериментальной техники не может заменить находчивости, изобретательности и глубины ума исследователя» (*цитир. по [18]*). К основным критериям оценки экспериментальных исследований относятся: 1) воспроизводимость (репликативность); 2) представительность (репрезентативность); 3) достоверность (валидность). Основными источниками ошибок в психологических экспериментах считаются: 1) ненадежность (прежде всего, из-за нестабильности побочных переменных); 2) смешение (прогнозируемых причин явления, основных и побочных факторов). Это очень близко к реальным причинам ошибок и в физико-технических экспериментах.

Весьма полезным является выделение понятий «идеального» (безупречного), модельного («очищенного») и разных видов реальных экспериментов.

Принципиальным является выбор критериев и способов выявления, дублирующей проверки и отбраковки «выбросов» (по Тьюки – FOP от «Far Out Point» [18]). Имеется разница в причинах и смыслах между выбросами, грубыми ошибками, аномальными результатами и прочими большими отклонениями от среднестатистических. Некоторые их виды могут полезно использоваться при обработке, а могут даже свидетельствовать о неизвестных или неучтенных явлениях.

«Формально-процедурные» (на практике также часто требующие творческого подхода) вопросы статистической обработки излагаются в многочисленной справочной литературе, не всегда, к сожалению, необходимого качества. Можно рекомендовать ясные, высокопрофессиональные и пригодные для пользователей любой квалификации книги [22, 23].

До сих пор сохраняется актуальность вопроса об оптимальных планах экспериментов и их обработки с точки зрения достоверности, информативности и экономичности. Исторически в СССР неформальным лидером в этой области был В.В. Налимов (кстати, кандидатскую и докторскую диссертации он защищал по химической метрологии, был заместителем академика А.Н. Колмогорова, а до конца своей драматичной жизни (1910 – 1997) был главным научным сотрудником лаборатории математико-

статистических методов на биофаке МГУ). Наибольшее фактическое влияние, вызвавшее волну последователей и пользователей, сыграла его книга с Н.А. Черновой [24] (которая сейчас в списках его трудов не цитируется). Появились детально отработанные процедуры и программы, как для планирования, так и для обработки многофакторных многоуровневых экспериментов с вышеназванным подходом. Они стали называться оптимальными, активными или экстремальными [25].

Привычно используются стандартные процедуры дисперсионного и регрессионного анализа или разрабатываются специфичные для данных процессов методы корреляции и аппроксимации.

Во многих технических экспериментах ограничиваются условно средними значениями характеристик и оценкой разброса. В других группах исследований необходимо иметь более детальную информацию о погрешностях (обычно оцениваются средняя квадратичная погрешность и надежность при выбранном доверительном интервале; но иногда используются и функции распределения, отличающиеся от нормального Гауссова).

В ряде исследований необходимо использовать так называемые «нечисловые» характеристики (органолептические, сенсорные, оценки опытных специалистов-экспертов). Имеются еще более нечеткие оценки характеристик, чем величины с погрешностями, – так называемые нечеткие (размытые) множества. Наконец, разрабатываются методы обработки и анализа, конкурирующие со стандартными процедурами поиска корреляционных соотношений методами наименьших квадратов, так называемые методы нейронных сетей.

Все эти методы и разработки составляют инструментарий исследователя. Многими из них мы многократно пользовались (см. библиографию в [3, 4]).

Заслуживают внимания другие разрабатываемые методы: вейвлет-анализа (по-видимому, незаменимые при анализе сложных непрерывных зашумленных сигналов); пинч-анализа (особенно при термодинамическом анализе процессов с несколькими энергоисточниками) и пр.

Однако ведущим остается главное требование: «Формализация, компьютеризация, информатизация и пр. должны способствовать творческому процессу, а не сковывать его, направляя работу по жесткому руслу».

Все это вместе составляет представляемую методологию научных исследований и экспериментов в процессах и аппаратах, в частности, в процессах сушки.

## 2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ МОДЕЛИ. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕНОСА

### 2 Явления переноса и кинетика промышленных процессов: модели и реальность

Методология экспериментальных исследований зависит как от принимаемого способа описания и анализа исследуемых процессов (т.е. от их моделей), так и от соответствия этих моделей реальности. Реальные процессы химической и огромного числа родственных технологий включают в себя многочисленные первичные и сопутствующие явления переноса и превращения. Число явлений, определяющих промышленный процесс, может достигать десятков и сотен [1, 3]. В разных конкретных условиях лимитирующими, определяющими реальную кинетику процесса, могут оказываться разные явления или наборы явлений. Для их описания используются разнообразные виды подходов и моделей [1, 3, 26]: феноменологические и статистические, сплошной и дискретной среды, разного уровня, теоретические, инженерные и эмпирические, вплоть до «черного ящика» (из которого при творческом подходе тоже можно извлечь информацию, имеющую познавательный смысл). Однако соответствие используемых моделей реальности и учет этого в методологии исследований требуют в настоящее время особого внимания. Анализ причин неадекватности существующих моделей реальным процессам является самостоятельной задачей (например, [1 – 3] и приведенная в них библиография). Здесь укажем только основные причины несоответствия: 1) «переупрощение» моделей; 2) «переусложнение» моделей; 3) недостаточная изученность механизма явлений и процессов. Уже простое выделение в качестве возможных каких-либо из этих причин влияет на составляемый план и методологию экспериментов. Практика показывает, что большинство ошибок (а также «парадоксов» переупрощения и переусложнения, в том числе знаменитых) вызвано последней группой причин. При этом упомянутая выше эйфория от успехов компьютеризации и формального моделирования делает эти ошибки особенно досадными.

Перечислим для обзора общей картины перечень из 11-ти таких характерных примеров сопоставления «модель-реальность», отобранных, в основном, из практики авторов и представляемых ими коллек-

тивов [1 – 3]. 1) Взаимосвязь гидродинамики и массопереноса при жидкостной экстракции. Эффект влияния интенсивности и направления массопереноса на предельные нагрузки. 2) Подобие и масштабный переход. Немоделируемость структур потоков. 3) «Концевые эффекты». Гидро- и механохимические явления. 4) Изменение коэффициентов теплоотдачи в процессе сушки. Эффект увеличения интенсивности теплоотдачи при испарении. 5) Образование поверхностных пузырей при сушке. Эффект экстремума температуры псевдокипения при сушке дисперсий и растворов. 6) Испарение растворителей: коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{evap}$  и массоотдачи  $\beta_{evap}$  при испарении. Несоблюдение теплодиффузионной аналогии. Эффект разного влияния скорости обдува на  $\alpha_{evap}$  и  $\beta_{evap}$ . 7) Особенности внешнего тепло- массопереноса. Наложения. Циклические процессы. 8) Температурно-влажностные зависимости при сушке растворителей, покрытий, дисперсий, кристаллообразующих растворов и волокнистых материалов. Расчетные модели взаимосвязанного тепло-массопереноса. 9) Химические превращения при сушке. Уравнение эффективной скорости реакции и моделирование сушки адгезивов. 10) Реология вытяжки-усадки материалов при сушке. Уравнения составляющих деформаций и моделирование сушки и термообработки волокнистых материалов. 11) Массотепло-электроперенос при мембранном разделении.

Во всех этих примерах имеются проблемы, остающиеся до сих пор открытыми. Видно, что эти примеры охватывают практически все основные группы процессов химической технологии: гидромеханические, тепловые, диффузионные (жидкофазные, твердофазные, мембранные), химические, деформационно-реологические и комплексные взаимосвязанные. В [1 – 3] показаны примененные в них подходы и приемы, которые могут быть полезными также в других процессах химической и родственных технологий. Некоторые методологические особенности, относящиеся непосредственно к теме настоящего доклада, кратко перечислены ниже. (В работе [4] непосредственно исследуются процессы, относящиеся к примерам 4, 6 – 10).

### **3 Теплофизические измерения. Обратные задачи. Аналитические и численные методы**

В описания сложных взаимосвязанных процессов могут входить десятки наименований теплофизических, диффузионных, физико-механических, химических, реологических свойств и кинетических характеристик для обрабатываемых материалов, внешней среды, аппаратуры, граничных условий, а также коэффициентов взаимосвязи между характеристиками переноса и превращения, не считая «нечисловых», но часто определяющих качественных и других характеристик продуктов.

В вышеупомянутых (см. 1-ю часть доклада) «идеальных» экспериментах все эти показатели должны были бы измеряться индивидуально (независимо). Для инженерных, да и для многих научных работ, вообще желательно было бы брать их все из справочной литературы.

В действительности же для комплексных процессов, например, сушки, таких величин очень мало: плотность, теплоемкость, вязкость, температуры и теплоты фазовых превращений и немногие другие. Да и то, эти и все без исключения справочные характеристики весьма желательно проверять по реперным точкам, так как отклонения встречаются, а они могут быть причиной грубо ошибочных выводов.

Некоторые характеристики в сушильной практике не измеряются только из-за сложности, трудоемкости и необходимости специальной аппаратуры. Особо важными и лимитирующими скорость процессов сушки являются коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  и диффузии  $D$ . Первые желательно измерять в стационарных условиях, что и делается в наших работах. Вторые – тем более, но это мало реально: обычно это доступно только профессионалам в области таких измерений (см., например, [16]). Мы в таких случаях пользуемся сопоставительным анализом всех имеющихся литературных данных с привлечением теоретических и других возможных соображений. Однако коэффициенты диффузии (вследствие самой физической природы переноса в твердом теле, жидкости и газе) сильно изменчивы, особенно для материалов с изменчивой и гетеропористой (вплоть до замкнутых пор) структурой, в отличие от непористых материалов, для которых стабильность  $\lambda$  и  $D$  примерно равноценна. Например, для целлюлозных материалов величины  $D$  могут изменяться на несколько (до десяти!) порядков, при достаточно стабильных тепловых характеристиках  $\lambda$  и  $a$ . Естественно, в таких условиях при диффузионной постановке задач приходится находить  $D$  из тех же, но специально поставленных, опытов по сушке, что все равно недостаточно надежно. Еще более проблематично независимое определение коэффициентов термодиф-

фузии, локальных критериев фазового превращения и около десятка других характеристик переноса при сушке, для которых изменчива и часто спорна сама природа явлений. Поэтому нами развивается другое направление, позволяющее обходиться оценочными значениями коэффициентов диффузии и других величин такого характера за счет использования температурно-влажностных зависимостей, непосредственно устанавливающих взаимосвязь между кинетикой сушки и нагрева, и ряда других приемов (см. 3-ю часть доклада).

Широко развиваются (в ТИХМе, а затем ТГТУ – традиционно, начиная с работ В.В. Власова) разнообразные методы комплексных измерений переносных свойств в нестационарных условиях. Их достоинство – экспрессность и комплексность, а иногда стационарные методы вообще непригодны. Для сушки применять такие методы можно и нужно с учетом вышеупомянутой изменчивости механизмов переноса.

При строгих постановках теплофизических измерений, естественно, крайне желательны постановка и решение соответствующих обратных задач. При этом как для прямых, так и для обратных задач, вопрос о способах их решения (аналитические или численные) является вторичным: самым главным является экспериментальная техника и корректность эксперимента (как измерительного, так и кинетического).

На данном этапе работы мы пока получаем и применяем, в основном, аналитические решения: в интервальной постановке по времени и координатам; при кусочно-ступенчатом задании свойств, коэффициентов переноса и размеров по зонам; при функционально заданных начальных условиях; с использованием «эффективных» кинетических характеристик и «эквивалентизированных» граничных условий (см., например, одну из первых итоговых публикаций [27] и все другие наши работы в списке литературы к настоящему докладу).

Практика показывает, что для нахождения свойств и коэффициентов как из измерительных, так и из кинетических экспериментальных данных, часто целесообразнее пользоваться решениями не обратных, а прямых задач, подбирая подходящий для данного случая алгоритм перебора значений отыскиваемых величин.

### 3 ПРОЦЕССЫ СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ

#### 4 Особенности сушки материалов с существенной температурной кинетикой

Проведенные в последние годы на кафедре «Химическая инженерия» («Процессы и аппараты химической технологии») ТГТУ экспериментальные и теоретические работы по испарению растворителей, сушке пропиточно-промазочных составов и покрытий, сушке дисперсий и кристаллообразующих растворов, сушке и термообработке волокнистых полимерных, асбесто-целлюлозных и других рулонных материалов, тепловой обработке рулонных и формованных резинотехнических изделий [1 – 4, 8 – 14] и дополнительный сопоставительный анализ ранее проведенных [5 – 7] исследований позволили сформулировать единый подход к созданию комплексной методологии физического и математического моделирования упомянутой обширной группы тепло-массообменных процессов. К этой группе относятся также многие другие процессы сушки до умеренных влагосодержаний при разных способах теплоподвода (конвективном, в том числе с сопловым обдувом, инфракрасном, контактном-кондуктивном, в среде перегретого водяного пара и пр.). Такой подход называется нами «единым», поскольку он применим ко всем крупно-капиллярно или гетеропористым материалам, которые составляют более половины номенклатуры всех материалов, подвергающихся сушке и тепловой обработке. Неприменим такой подход, собственно говоря, только к непористым материалам и к глубокой сушке, однако и здесь развиваемая методология экспериментальных исследований и математического описания может также успешно использоваться.

Основная особенность рассматриваемых процессов состоит в том, что в них время, необходимое для удаления влаги термической сушкой до требуемого конечного (обычно близкого к равновесному или «квазиравновесному») влагосодержания, и время их прогрева до конечной температуры (близкой к постоянной температуре среды или к максимальной «квазиравновесной» температуре материала) одного порядка. Для материалов с высоким диффузионным сопротивлением, наоборот, время прогрева пренебрежимо мало по сравнению со временем сушки, и процессы определяются диффузией, диффузионной кине-

тикой. Таким образом, для рассматриваемых материалов можно сказать, что в процессах их обработки «температурная кинетика существенна».

В этом случае удается экспериментально изучать, сопоставлять и анализировать температурные кривые сушки  $T(\tau)$ , что позволяет использовать их для описания и математического моделирования взаимосвязанных процессов сушки и нагрева. При этом легко находятся также вполне поддающиеся физической интерпретации и математической аппроксимации самостоятельные температурно-влажностные зависимости (ТВЗ) между температурой и влагосодержанием материала  $T(u)$ . Тогда, как говорилось выше, можно описывать процесс на базе: 1) дифференциальных уравнений теплопроводности с достаточно надежно определяемыми теплофизическими характеристиками; 2) дифференциальных уравнений диффузии с оценочными значениями коэффициентов диффузии и других сильно изменчивых по своей природе свойств и кинетических коэффициентов; 3) дополнительных, недостающих для замыкания системы, уравнений взаимосвязи между температурой и влагосодержанием. При этом оценочные коэффициенты в процессе итерационных расчетов корректируются до обеспечения требуемой точности ТВЗ, обычно на поверхности материала. Кинетический баланс обеспечивается достаточно надежными базовыми значениями коэффициентов теплоотдачи при испарении  $\alpha_{evap}$  и при «сухом» нагреве  $\alpha_{dry}$  и массоотдачи при испарении  $\beta_{evap}$ .

Изучение температурной кинетики дает и другие преимущества и возможности. В современных интенсивных и комплексных процессах сушки кинетика нагрева часто становится «более важной», чем собственно удаление влаги: например, для термолабильных материалов, при химических, физико-химических и структурно-деформационных превращениях. Именно этими превращениями определяется обычно качество продукта. Скорость же химических реакций и реологических процессов обычно зависит от температуры экспоненциально (по Аррениусовскому типу), в то время как зависимость их от влагосодержания существенно слабее (линейная или степенная).

Температурные кривые  $T(\tau)$  и  $T(u)$  часто имеют выраженные «температурные площадки» («plateau») или изменения знака кривизны (перегибы), и являются поэтому более информативными для анализа механизма сушки и явлений переноса в целом, чем близкие к монотонным кривые убыли влагосодержания  $\bar{u}(\tau)$ . При этом они более надежны, чем получаемые дифференцированием традиционные кривые скорости сушки  $N(\bar{u})$ , ( $N = -d\bar{u} / d\tau$ ).

Такой подход позволяет также выявлять, непосредственно моделировать и учитывать другие специфичные явления переноса, часто лимитирующие скорость процесса или качество продукта, например: пленкообразование, выпадение кристаллов и структурирование; усадку, вытяжку и трещинообразование; образование внутренних пор или пузырьков пропиточного состава на поверхности материала; влияние сушки на внешний тепло-массообмен и др.

Наконец, использование температурных кривых позволяет выполнить классификацию материалов, режимов и процессов сушки по кинетическим признакам, что является важным для выбора алгоритмов при математическом моделировании и в целом для инженерного анализа, выбора, расчета, оптимизации и проектирования сушильно-термических процессов и оборудования.

Ясно, что выбор такого подхода к исследованию процессов сушки определяет и методологию экспериментов, и перечень необходимых экспериментальных установок и измерительных приборов.

## **5 Виды и методики сушильных экспериментов и экспериментальные установки. Методология экспериментальных исследований процессов сушки**

Комплексные экспериментальные исследования процессов сушки и тепловой обработки включают следующие, разные по назначению серии методов и методик: 1) «первичные» (пробные) эксперименты; 2) «модельные» эксперименты, проводимые в возможно более «чистых» условиях с целью получения надежных данных, прежде всего – для «базовых» характеристик; 3) «классификационные» эксперименты, в которых ведется поиск условий, соответствующих всем возможным классификационным типам кинетических кривых; 4) «кинетические» эксперименты, по возможности с варьированием одной переменной; 5) «диапазонные» эксперименты для расширения диапазона изменения варьируемых параметров; 6) «сравнительные» эксперименты в измененных условиях, на других экспериментальных установках, с другими материалами для выяснения обнаруженных особенностей; 7) «отсеивающие»

эксперименты в условиях, исключающих («отсеивающих») проверяемый эффект; 8) визуальные (в том числе микроскопические) наблюдения за исследуемым материалом в процессе его обработки; 9) специальные эксперименты для изучения химических и деформационно-реологических процессов; 10) «технологические» эксперименты с наработкой материалов для анализа качества, проводимые обычно на «проходных» установках или на установках с укрупненными образцами материала; 11) промышленные эксперименты. Отдельно проводятся «измерительные» эксперименты для измерения свойств материалов.

Конкретные планы экспериментов составляются для каждой рассматриваемой группы процессов и материалов с учетом их индивидуальных особенностей. Для всех варьируемых параметров выбираются главный (иногда 2–3) и дополнительные уровни. Эти уровни поддерживаются примерно постоянными во всех экспериментах, что обеспечивает возможность использования результатов опыта при обработке данных в нескольких сериях. При использовании стандартных программ планирования экспериментов уровни выбираются в соответствии с этими процедурами.

В комплекс необходимых, впервые созданных или модернизированных экспериментальных установок, входят: 1) «большая» циркуляционная конвективная сушилка с возможностью дополнительного, в том числе кратковременного инфракрасного теплоподвода; 2) «щелевая» установка для промазанных образцов, в том числе для сушки в перегретом паре; 3) «сопловая» двухрежимная конвективно-радиационная установка; 4) «барабанная» кондуктивная установка, в том числе двухрежимная с двумя барабанами; 5) «реокинетическая» установка; 6) «визуальные» установки; 7) модифицированная для конвективной сушки камера дериватографа; 8) установка для сушки в кипящем слое на инертном носителе; 9) универсальный психро-эвапорометр. В обработке использовались также данные экспериментов, полученных на укрупненной «проходной» установке для шнуров и на «петлевой» многорежимной установке для тканей и шнуров во ВНИИРТмаше. Ряд экспериментов проводился на опытно-промышленных установках и в промышленных условиях.

На этих установках и по этим методикам разработана методология анализа температурно-влажностных кривых сушки для всего комплекса выделенных крупнокапиллярно- или гетеропористых материалов и единая кинетическая классификация процессов и материалов как объектов сушки, включающая шесть групп по наличию, вырождению или отсутствию температурных площадок вблизи температур мокрого термометра  $T_{\text{мт}}$  и кипения  $T_{\text{кип}}$  или соответствующих «псевдотемператур». Они определяют механизм и время сушки и непосредственно влияют на качественные показатели высушиваемых материалов. Дополнительно отметим, что если в экспериментальных или промышленных условиях не удается изучать непосредственно кинетику сушки, то можно получать зависимости  $\bar{u}(\tau)$  пересчетом из кривых  $T(\tau)$  и  $T(u)$ , полученных в более простых модельных условиях.

Практическое применение изложенной методологии полностью подтвердило ее эффективность.

### Список литературы

- 1 Коновалов В.И. Макрокинетика промышленных процессов / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова // Теор. основы хим. технол. 2004. Т. 38, № 2. С. 123 – 132.
- 2 Коновалов В.И. Явления переноса и кинетика промышленных процессов: модели и реальность / В.И. Коновалов // Сб. науч. тр. к 100-летию П.Г. Романкова / СПбГТИ. СПб., 2004. С. 53 – 71.
- 3 Гатапова Н.Ц. Единый подход к кинетике и моделированию сушки растворителей, покрытий, жидких дисперсий, кристаллообразующих растворов и волокнистых материалов / Н.Ц. Гатапова, В.И. Коновалов // Вестник ТГТУ. 2004. Т.10 – Юбилейный. № 1. Препринт № 09. 64 с.
- 4 Гатапова Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий и волокнистых материалов: Дис. ... докт. техн. наук. / Н.Ц. Гатапова. ТГТУ. Тамбов, 2004. 533 с. (Представлена к защите).
- 5 Коновалов В.И. (рук.). Исследование пропиточно-сушильных агрегатов: Сводный отчет по теме 47–61: В 2 т. Тамбов: ВНИИРТмаш, 1963. 233 с.
- 6 Коновалов В.И. Исследование процессов пропитки и сушки кордных материалов и разработка пропиточно-сушильных аппаратов резиновой промышленности: Дис. ... докт. техн. наук / В.И. Коновалов; ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1976. 415 с.

- 7 Коновалов В.И. Пропиточно-сушильное и клее-промазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. М.: Химия. 1989. 224 с.
- 8 Коновалов В.И. О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных тепло-диффузионных процессов в химических и других производствах / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова, Е.Н. Туголуков // Вестник ТГТУ. 1995. Т.1, № 3–4. С. 273 – 288.
- 9 Gatapova N.Z. Heat and Mass Transfer Analogy for Evaporation of Solvents / N.Z. Gatapova, E.A. Sergeeva, V.I. Konovalov, T. Kudra, A.V. Mozzhukhin // ММФ. Минск: ИТМО АНБ. 2000. Т.9. С. 94 – 100.
- 10 Гатапова Н.Ц. Особенности кинетики теплопередачи и сушки на контактных барабанах / Н.Ц. Гатапова, В.И. Коновалов, А.Н. Колиух, А.А.Савельев // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 7, № 3. С. 399 – 406.
- 11 Гатапова Н.Ц. Теплофизические и кинетические особенности сушки дисперсий и кристаллообразующих растворов / Н.Ц. Гатапова, В.И. Коновалов, А.Н. Шикунов, А.Н. Пахомов // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 2. С. 210 – 229.
- 12 Konovalov V.I. External heat – and masstransfer during the convective drying and heating of strips materials / V.I. Konovalov, N.Z. Gatapova // 11th Int. Drying Symp. (IDS'98). Keynote Lecture. Halkidiki, Greece. 1998. Vol. A. Pp. 23 – 34.
- 13 Konovalov V.I. Drying of Liquid Dispersions – A Unified Approach to Kinetics and Modeling / V.I. Konovalov, N.Z. Gatapova, T. Kudra // Drying Technology – An Int. Journal. New York: Dekker. 2003. Vol. 21. N. 6. Pp. 1029 – 1047.
- 14 Коновалов В.И. Кинетика сушки дисперсий на бинарном инертном носителе / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова, А.Н. Шикунов, А.Н. Утробин // Труды 5-го ММФ по тепло- и массообмену / ИТМО НАНБ. Минск, 2004. 11 с.
- 15 Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений / Дж. Тьюки. М.: Мир. 1981. 693 с. (Пер. с амер. издания 1977 г.).
- 16 Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерений. / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых. М.: Наука. 304 с.
- 17 Christensen L.B. Experimental methodology: 9th ed. / L.B. Christensen. Boston: MA, Allyn & Bacon. 2004. xii. 452 p.
- 18 Готтсданкер Р. Основы психологического эксперимента / Р. Готтсданкер М.: МГУ. 1982. 464 с. (Пер. с амер. издания 1978 г., сделанный в МГУ).
- 19 Регирер Е.И. О профессии исследователя в точных науках / Е.И. Регирер; Ред. акад. Н.М. Жаворонков М.: Наука. 1966. 168 с.
- 20 Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов / Д.А. Поспелов. М.: Радио и связь. 1989. 184 с.
- 21 Осуга С. Обработка знаний / С. Осуга. М.: Мир. 1989. 293 с. (Пер. 1-го тома 10-томного япон. издания 1986 г.).
- 22 Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев М.: Наука. 1970. 104 с. (Физ. фак. МГУ).
- 23 Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель; Ред. акад. Ж.И. Алферов. Л.: Наука. 1985. 112 с.
- 24 Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. М.: Наука. 1965. 264 с.
- 25 Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. М.: Высшая школа. 1985. 327 с.
- 26 Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры: 2-е изд. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: Физматлит. 2001. 320 с.
- 27 Коновалов В.И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 1–2. С. 75 – 90.

*Gregory F. Gruska*

## PROCESS MANAGEMENT: A CONCEPT OF VARIATION

For those just getting started in these concepts, let us review what is meant by variation. This should establish a common ground from which the discussion of probabilistic methods in production processes may be developed.

Webster's Dictionary speaks of variation as the exhibition of divergence in characteristics from those typical or usual in the group. Let us more simply state this idea by describing variation as the display of different values for a characteristic which we may rightly expect to be the same. Examples of variation are all around us. However, there is no particular law of nature which establishes the inherent necessity for the existence of variation. The «Law of Gravity» and «Newton's Laws of Motion» recognize and describe basic truths in nature. But, no such law for variation exists. Variation, instead, must be introduced.

In nature, there are many instances where no variation is inherent in the value which interests us. For example, let us consider the boiling point of water. Water at sea level, a pressure of one atmosphere, will boil at a temperature of 212 °F. It will boil at this temperature every time. This is a characteristic of the water molecule. No variation exists here.

However, let us conduct a series of tests in an attempt to measure the temperature at which water boils. The test is run ten times. The values are found to be 211°, 210° 213° , 212°, 209°, 210°, 210°, 211°, 212° , and 211°. Remarkable enough we see that out of the ten trials, we obtained eight different answers. Yet, how can this be so? The theoretical boiling point of water hasn't changed. But variation now exists in the value. A display of different values has resulted for a characteristic which we may rightly expect to be 212 °F. This by definition is variation. It must be concluded then that variation was introduced. Some condition of the experiment caused the final determinant to deviate from the true value.

Let us consider what factors may have introduced variation into the results of the experiment. Three elements might have been responsible for the variation in the value for the boiling point of water. First, the pressure under which the experiment was conducted may not have been held constant. Secondly, different amounts of impurities may have been present in the samples of water in the ten trials. This would affect the boiling point. Finally, our means of measurement might not have been sufficiently accurate. Repeatability may not have been possible. Any one of these or more likely a combination of these resulted in the cluster of values which we obtained for the boiling point of water. Variation introduced by two or more of the factors interacted together to give us the values which resulted.

Let us examine how the individual variations might themselves affect the value for the boiling point and then how the two variations might combine or interact to affect the boiling point. We know that water containing salt impurities has a boiling point higher than 212 °F. We also know that water under a pressure of more than one atmosphere has a higher boiling point than 212 °F., while water under a pressure of less than one atmosphere has a boiling point below 212 °F. The variation in these two factors may interact in either of two ways. First, the variations may tend to off set each other to produce a value very close to 212 °F. Impure water under low pressure can boil at 212 °F. Here the variations interacted to produce a value which we know to be correct. The effect of each variation tended to cancel the effect of the other.

However, the effects of the variation in the two factors may also tend to compound the error. Impure water under a high pressure will have a boiling point considerably greater than 212 °F. The variation in pressure and purity combined or interacted to produce a value which contained more error than either variation produced alone.

We have seen how variation is introduced and how variation may interact or combine. Nevertheless, let us carefully note the following observation. If we can possibly determine all factors which influence the boiling point of water and in some manner insure that each remains constant, we will experience no variation in the value for the boiling point of water. All values will be 212 °F. for variation is not inherent in any system. But, if we allow variation to be introduced in even one factor, it will influence the entire system. Since variation is not inherent, we know that some factor in the system is responsible for it. The cause may then be determined and the variation can be controlled.

Now, let us consider the two types of variation which concern people involved in design and production. First, we have design variation or that variation which is incorporated in a design through the assignment of tol-

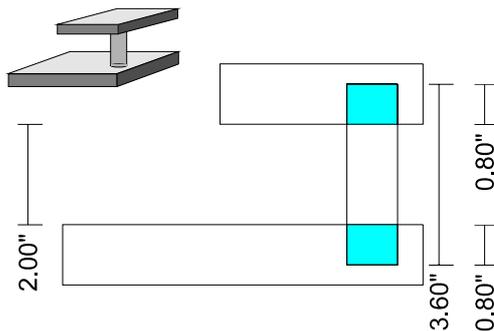
erances to the various dimensions. The second type of variation we have is process variation or that variation which is introduced by the production processes.

**Variation in Design:**

The design engineer specifies a target value, an average value, for a dimension and a certain acceptable deviation from this target which is known as the tolerance. The design engineer, in establishing a tolerance, recognizes the fact that variation will always be introduced in the product. That is, variation exists in every process. The tolerance specifies how much variation is tolerable, how much variation can be introduced before the customer will be adversely affected by the presence of the variation. The design engineer states that the design is valid within these limits. (See Chapter xx for further discussion on functional specifications and customer sensitivity/loss functions.)

However, one point becomes critical and that is the idea of the interaction of variation. We have seen an example of the interaction of variation in conjunction with the water experiment. How, then, does the concept of variation interaction affect the design engineer? To answer this question, let us examine the design of a hypothetical assembly which we shall call a «support assembly».

This product consists of two steel blocks, an upper support block and a lower support block, separated by a support pin which is inserted in holes in each of the blocks. A resultant dimension is the distance between the two blocks into which another as



sembly must be inserted. The blueprint calls for the dimensions and tolerances as indicated.

Let us suppose that we have three boxes of parts, each containing 500 components. One box contains 500 support pins, another 500 lower support blocks and the third 500 upper support blocks. In addition, we specify that the dimensions of each part fall within the tolerance range outlined by the design engineer. What possible combinations of components can result from the assembly of these parts? We can easily see that there is an extremely large number. For instance, suppose that an operator randomly selects a part from each container and measures the parts. The support pin is found to be 3.605 inches long. The depth of the hole in the upper support block is found to be 0.785 inches and the depth of the hole in the lower support block is 0.805 inches. What then is the critical clearance factor between the two support blocks? We can determine this by subtracting the sum of the two hole depths from the length of the support pin. That portion of the support pin which is not inserted in either hole represents the distance between the two blocks, the critical clearance factor.

For this first selection of parts by the operator, the distance between the blocks would be:

$$3.605 - (0.785 + 0.805) = \mathbf{2.015}$$

We see that this value for the clearance would fall within the tolerance range for the dimension specified by the design engineer. Since, at this point, we are interested in a design analysis, we assume that the parts are assembled exactly as the blueprint indicates. We make no allowance for machine or operator error. We would consider these errors later in a process evaluation.

The operator continues to randomly select components and build assemblies. Suppose he makes the following part selection:

- Length of Support Pin = 3.615
- Depth of Hole in Upper Support Block = 0.785
- Depth of Hole in Lower Support Block = 0.790

The resulting assembly is taken and the clearance factor is measured. This distance will be equal to:

$$3.615 - (0.785 + 0.790) = 2.040$$

But this outcome is unacceptable. It does not lie within the range of  $2.000 \pm .020$  which is permissible for the value of the clearance to be. How can this defect be accounted for? We know that the components of the assembly all comply with blueprint specifications. The parts are assembled precisely as the blueprint calls for. Yet a clearance factor has resulted which is «out of spec.». This unacceptable outcome has resulted from the interaction of design variation. The individual component variations complied with the allowable tolerances. However, the interaction of these design variations caused another dimension to vary outside its tolerance range.

Variation interaction has become crucial. Essentially, the theoretical operator randomly selected a support pin on the «long» side and two support blocks with holes on the «shallow» side, and although each was acceptable by itself, the combination of the variations caused another dimension, the clearance between the support blocks, to deviate from its assigned range of values. The operator could have selected at random a support pin on the «short» side and two support blocks with holes on the «deep» side and again the clearance factor might have been unacceptable. While before, the value was too large, this clearance factor would be too small. In either case, the interaction of design variation caused this quality problem.

The design engineer had failed to consider this possibility when designing this product. And yet, the support assembly is relatively simple. We have only one resultant dimension here and only a very few components affecting it. We can easily see that the possibilities for variation interaction are far greater in the design of a more complicated assembly such as an engine block or a transmission casing.

Variation interaction is extremely important. If this interaction causes breakdowns within a design, then no matter how closely assembly or manufacturing people work to specifications, quality problems will result. Scrap and rework costs will rise.

We have seen that variation interaction can cause dimensions to exceed specification. Yet, how could the design engineer possibly be in a position to foresee or predict what this interaction would be? How could s/he be sure that the assembly was correctly designed with proper tolerances assignment? There is an ideal solution to this problem. This engineer would most certainly wish to be able to predict the effect of variation interaction on the assembly to be able to predict whether critical dimensions could be maintained under the conditions of design during the assignment of tolerances. The design engineer would want to know these things before committing the design to production, before money was invested in tools to produce the component parts, before production schedules were planned dependent upon his assembly, before quality deficiencies caused production tie-ups.

In summary then we have made three major points. First, we have seen how variation is introduced in design. Secondly, we have seen how variation interaction can affect both quality and cost. Finally, we have witnessed how valuable a means of predicting this effect would be.

#### **Variation in Process:**

Let us now consider process variation. We know that process variation is that variation which is introduced by the manufacturing or assembly operations associated with the product.

First, how would we discover whether process variation exists? Let us use our «support assembly» as an example. Suppose a number of these assemblies is selected at random from the assembly line and the clearance dimension measured. It is found that a cluster of different values is obtained for this dimension which design engineering has specified to have a mean value of 2.000 inches. We have thus determined that variation is present in the system, our support assembly. Variation has been introduced by , a single, or more likely, by each of the processes which affect the components of the assembly.

What are some of the factors which might affect this dimension? Basically, we may summarize them to be the length of the support pin and the depth of each of the holes. Machining operations in turn are responsible for the factors which have been listed. Let us consider each of these factors in turn and how variation might have been introduced by the machining operations which are associated with each.

We have said that the length of the support pin is critical. How might variation have been introduced here? Suppose that rod stock is fed through a machine which automatically measures the proper length and cuts the stock to size. The fixture which determines the length will wear out introducing variation here. The cutting tool may make a wider or narrower cut depending on tool hardness, tool wear, or stock hardness. This would also introduce variation into the length of the pin.

Next, let us examine the operations which might cause the depth of the holes to deviate from the specified value. The thickness of the stock placed in the drill press is one determinant of the depth of the hole. The pre-

set fixture which determines the point at which the drill «bottoms out» is also a determinant of the depth of the hole. In addition, stock and drill hardness would influence the hole depth.

These are examples of how variation might be introduced in each of the assembly factors and we know that in the vast majority of cases variation will be introduced in each determining factor. Thus, variation in the particular dimension which is of interest is probably caused by the interaction of the variations in the component dimensions. For instance, a combination of «deep» holes in the blocks plus a «long» pin will perhaps yield an acceptable value for the clearance factor. The interaction of «deep» holes and a «short» pin, instead of offsetting each other, would compound the difficulty resulting in a narrow and «unacceptable» value for the distance between the blocks. The interaction of the variations in the components has resulted in a quality deficiency. Again, we have another example of the relationship between variation and quality.

**Economics of Variation:**

What about the effect of variation on cost? The most obvious effect would, of course, be found in scrap or rework cost. As variation causes severe quality problems, scrap or rework costs will rise. Yet, many more subtle cost implications are also present. Consider for a moment the grinding and drilling operations mentioned in the processing of the components of the support assembly. Variations in the hardness of stock, introduced perhaps by non-constant factors at a quenching operation will cause grinding wheel, die, and cutting tool life to vary. Stock which varies in the extreme on the «hard» side will cause replacement costs of these items to rise. Since inspection is not 100 % effective, there is a chance that unacceptable products will be delivered to the customer. These parts will add additional costs to the customer’s process and will affect us due to returns and customer dissatisfaction. Thus, it may be seen that variation can directly and influence costs.

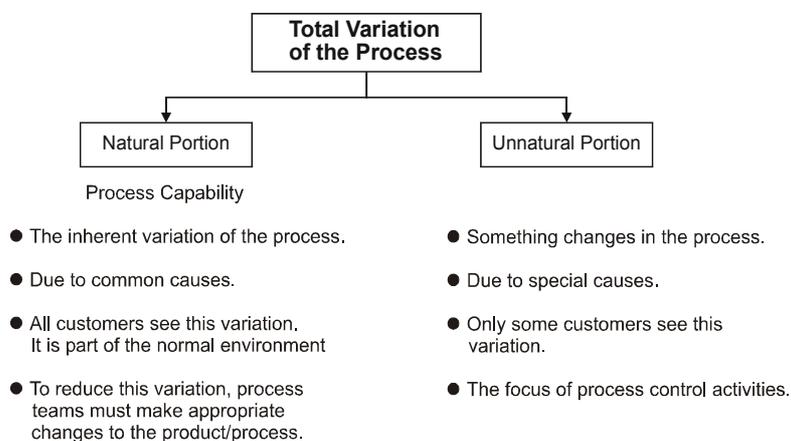
Let us examine the value which we would derive from having a means of predicting the effect of process variation. What would the role of such techniques be in the achievement of quality and performance excellence?

Initially, process management will permit the evaluation of the quality and performance capabilities of the processes involved in the manufacture and assembly of the components of the support assembly. The process team would be in a position to predict what the clearance factor would be between the two support blocks under the present set of process capabilities. They could determine whether it was possible to obtain a quality job utilizing the processes presently being employed. Evaluation could also be made of proposed changes in processes. Management might wish to know if an improvement in a drilling operation due to improved tooling would significantly affect the clearance factor. This question could (and should) be answered before capital expenditures were made to purchase the new machine.

Perhaps interest centers around a requirement which after final assembly is enclosed in a casing. No physical means of measurement are possible. Yet, the effect of process capabilities on this requirement may be evaluated through the use of this technique. Finally, suppose that the critical factor is visible but that it is a rather intangible quantity such as deviation from centerline or «run-out», taper, or perhaps properties of rotation such as «balance» or torque.

**Process Management: Capability and Control**

At this point, we have again made three major observations with regard to process variation. First, we have seen how process variation might be introduced. Second, we have seen how process variation can affect cost and quality. Finally, we have seen how valuable a means of predicting and managing these effects would be.

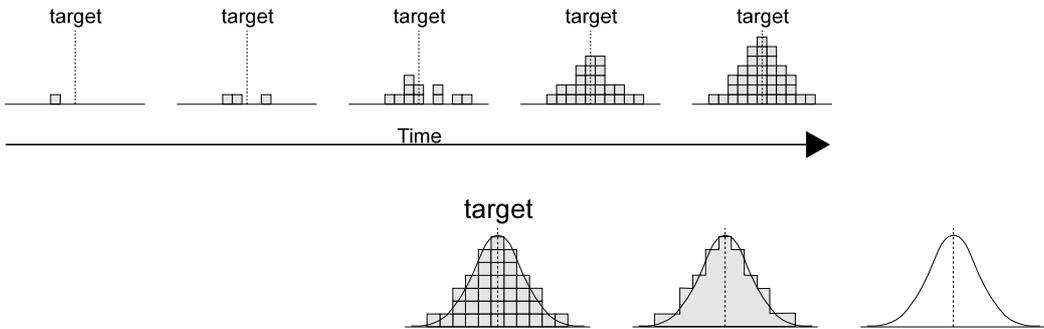


**Figure II-1: Components of Total Process Variation**

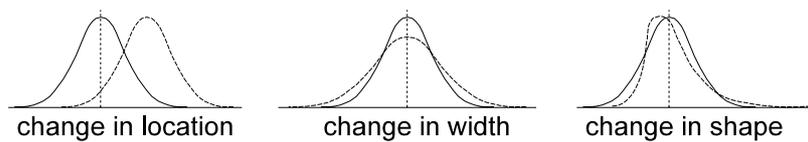
**Variation Management**

To manage variation, we must first understand the nature of variation. The total variation of a process can be divided into two mutually exclusive subsets: the natural variation of the process and the «unnatural» variation (see figure II-1).

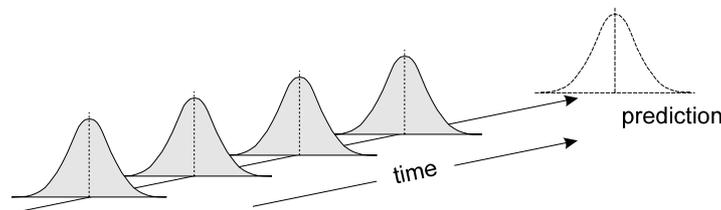
Natural variation is the inherent variation of the process. It is always present - i.e. every result/customer has an equal chance of seeing the effect of this variation. Because of this variation results will vary from each other, but together they form a pattern called a distribution.



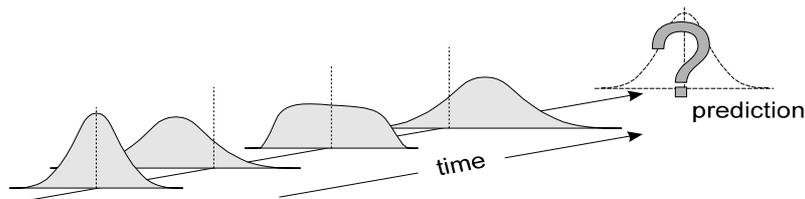
Distributions can differ from each other in location, width or spread, and shape.



The sources of variation which cause this variation are called common or chance causes. When only the common cause sources of variation are active in the process, the process can be described by the terms stable, predictable, and consistent and the resultant range of variation is called the capability of the process.



The unnatural variation is due to special causes. Special cause sources of variation are not always active, and when they do become active they make themselves known by changing the process - either by shifting its location or increasing its variation or both. In a process where special and common causes are present, all the parts/customers will be affected by the common causes but only some will be influenced by the special causes. If special causes of variation are present, the process is not stable over time and consequently not predictable.



Some examples of special causes are:

- mixed lots of incoming material due to multiple suppliers, poor supplier process control, or poor inventory management of completed materials
- operators with insufficient training and experience

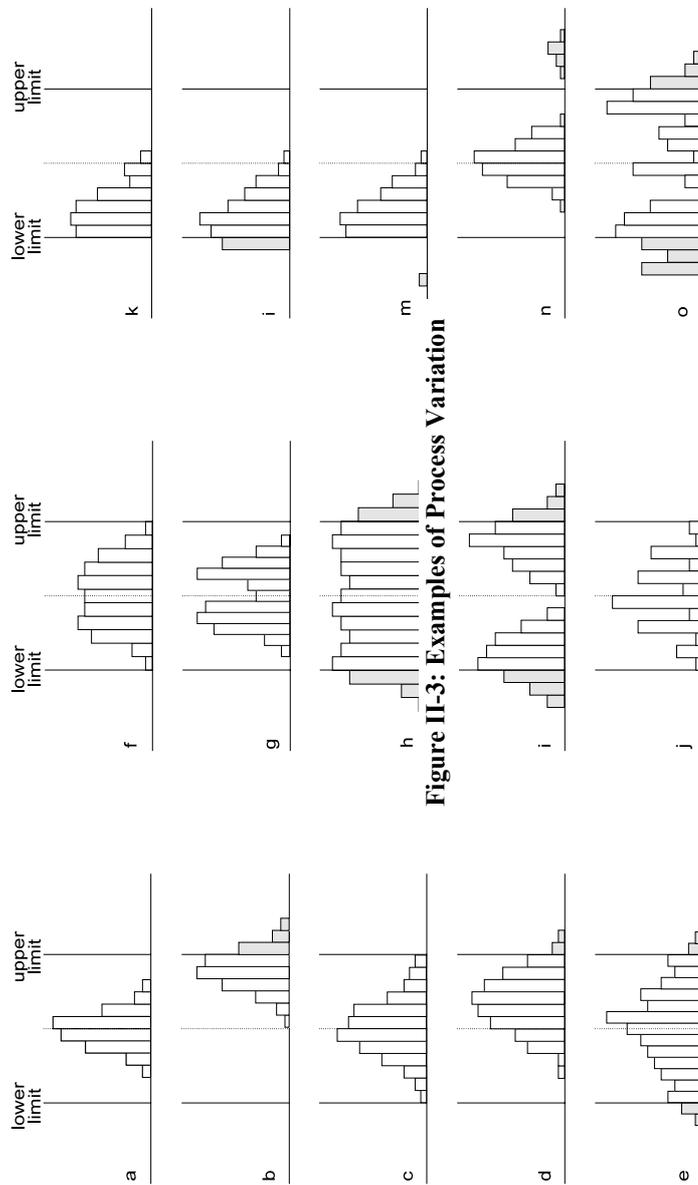
- subjective interpretation of specification or operating instructions
- poor preventive maintenance
- inconsistent set-up
- multiple process conditions such as multiple machines/tooling, spindles, fixtures, etc.
- tool wear or premature breakage
- environmental conditions such as changes in temperature, humidity, pollution, contamination, etc.
- conditions caused by a lack of a systems approach in the design of the product and process

In his books (*Out of The Crisis* and *The New Economics*) Dr. W.E. Deming identifies two mistakes frequently made in process control:

«Mistake 1. To react to an outcome as if it came from a special cause, when actually it came from common causes of variation.

Mistake 2. To treat an outcome as if it came from common causes of variation, when actually it came from a special cause.»

For effective variation management during production we must have effective means of detecting special causes. One method is the use of histograms. Histograms are the graphical representation of the distributional form of the process variation. Figure II-3 contains some examples of histograms depicting typical process variation.



**Figure II-3: Examples of Process Variation**

Figure II-3: Examples of Process Variation

If figure II-3a is a baseline histogram of the process as it was in the past and any of the other histograms represent the process as it is operating now, we can safely say that something has changed. That is, a special cause is now present in the process. Even if we do not have a baseline, we can tell that figures II-3f through j have a special cause present since the distributional form generated by common causes will be unimodal and symmetrical. The existence of two or more distributional forms is a sure indicator of the existence of special causes. Unfortunately this criteria provides only a sufficient but not a necessary test for special causes. That is, some special causes may change the process without destroying its symmetry or unimodality. Without the historical baseline we would not be able to determine if the forms in figure II-3b through e were caused by special causes.

Process management does provide necessary and sufficient methods of determining if special causes exist. Although several classes of probabilistic methods are useful in this task, the most versatile and robust is the genre of Control Charts which were first developed and implemented by Dr. Shewhart in the late 1920's.

It is impossible to reduce both mistakes (above) to zero. Dr. Shewhart realized this and developed a graphical approach to minimize, over the long run, the economic loss from both mistakes.

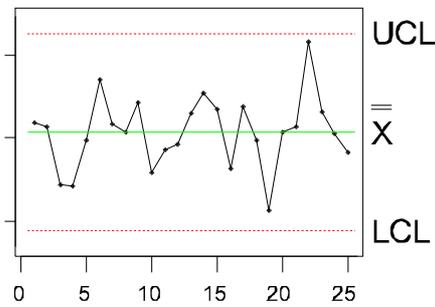


Figure II-4: Example of a control chart

If our process control activities assure us that no special cause sources of variation are active by eliminating their existence or detecting them and removing their effect when they do occur, the process is said to be in-statistical-control or in-control. Such processes are said to be stable, predictable, and consistent since it is possible to predict the performance of the process.

The active existence of any special cause will render the process out-of-statistical-control or out of control. The performance of such unstable processes can not be predicted.

The discussion till now has not included any reference to the acceptability or goodness of the process variation. This requires the evaluation of the process variation against an externally (i.e. customer) imposed requirement. For dimensional characteristics these are often called tolerances or specifications. The process capability is considered acceptable if all results of the natural variation satisfies the requirements. For dimensional characteristics this can be stated as: the natural variation is wholly contained within the specification limits. All other situations are considered to have unacceptable process capability. We do not talk about the acceptability of the process variation of an unstable process since such variation is unpredictable.

With these concepts, we can classify any process into one of four performance scenarios:

		Statistical Control	
		In-Control	Out-of Control
Process Capability	Acceptable	Case 1	Case 3
	Unacceptable	Case 2	Case 4

**Case 1** is the desired situation - the ideal case; while **Case 4** is the «basket» case. Our approach should always be to first move the process from the right column to the left and then make appropriate design changes in the product and/or process to reduce the natural variation first to satisfy the specification (**Case 2**) and then in recognition of the Loss function.

For **Case 1** the performance (i.e. what the customer receives) may or may not be acceptable. This depends on the location of the distributional form with respect to the customer target. Assuming that the first column of Figure II-3 represent processes in statistical control, we can see that Figures II-3a through d are **Case 1** but Figure II-3b and d are unacceptable since the processes are shifted so that they are producing nonconforming items. Process Control activities must assure not only that the process variation is acceptable but also that the process is on target.

**Case 2** is always unacceptable since even if the process is on target, nonconformance will be produced (e.g. see Figure II-3e). If we must use such a process for production, containment activities, such as 100 % inspection, must be part of the process control activities. This will assure that the chance a customer will receive a nonconforming item will be minimized.

**Case 4** is always unacceptable. The quantity on nonconformances will always be higher than in a corresponding **Case 2** process due to the presence of special causes.

For **Case 3** the acceptability depends on the process control activities in place and the type of special cause which is active. If the special cause has a random occurrence (e.g. Figure II-3n) and we have the process controls in place to rapidly detect and eliminate the special cause and its effect, the process performance is considered acceptable. We could even consider this situation an variant of **Case 1**. If the special cause is such that we can not establish the necessary controls to detect and eliminate, the process is unacceptable. If such a process is used for production, containment activities must be part of the process controls.

For a Case 3 to be acceptable specific conditions must be satisfied:

1. the cost of eliminating or controlling the special cause exceeds the loss to all customers; e.g. the loss function is flat over the specification range (see Chapter III);
2. the special cause has a predictable and consistent nature;
3. the process controls are developed to take advantage of the predictability of the special cause to assure that nonconformances will not be produced.

An example could be a process which has tool wear as a special cause. We could eliminate the effect of tool wear by changing the tooling frequently. But this adds tooling costs as well as impacts productivity. If the loss function over the specifications is flat, we can take advantage of this process robustness by establishing process controls to allow for a specified amount of tool wear. Figures II-3f and g could be examples the output from such processes. It is critical that the tooling be consistent and have predictable wear characteristics and that the process control include set-up and change control. Otherwise the process could rapidly become unacceptable (see Figures II-3h and i.)

If, as in the above example, a Case 3 process is used in production, the specific special cause being allowed must be clearly identified. These are called *economically allowable special causes* since the decision to use the process is an economic not a statistical one. The application of probabilistic methods and the calculation of statistics (e.g. mean, standard deviation, indices, etc.) without consideration of the actual scenario (i.e. including special cause) can lead to wrong decisions.

If an unacceptable process must be used in production, containment/inspection activities are required. The purpose of such activities to detect and contain nonconformance within the production environment (see Figures II-3k through m). However, such inspection results can also be collected and used also for process control. This requires the use of probabilistic methods to analyze the inspection results in a timely manner.

### **Summary**

Variation can be introduced into the design and production processes throughout the product development cycle. Since this variation affects the quality/reliability and cost - and consequently customer satisfaction - we must be able to analyze and manage it. To minimize the risks of a wrong decision, we must be able to effectively identify the critical sources of variation and predict their effects. This is possible only through the application of process management.

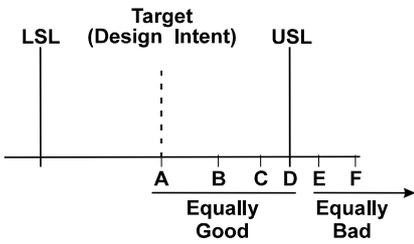
***Gregory F. Gruska***

Omnex, LLC. (Ann Arbor, MI, USA)

### **ROBUST DESIGNS** ***Product/Process Design***

The first step in managing variation is understanding how much variation is acceptable; i.e. how much deviation from a target or nominal value is allowable. Traditionally the value judgment of «acceptable» and «allowable» is based on the design engineer's understanding of the functional/customers' requirements and the physics of the design and usage environment (engineering subject matter knowledge), tempered by the economic constraints of the production process. The results of this part of the design process is reflected in the engineering specifications (tolerances).

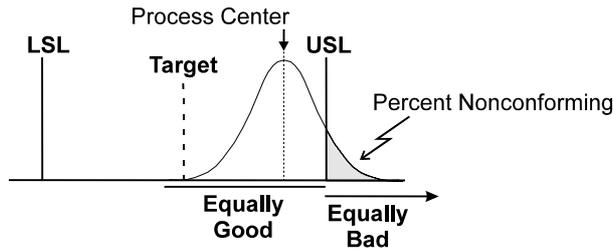
But what do the specifications mean? Ideally, all characteristics of a design should be equal to the design intent - that target value which would yield perfect results. But variation exists. So what is the difference between a characteristic at the target and one off target but within specification?



A common approach can be described using a «Goal Post» analogy. In many sports (e.g. football, soccer, hockey, basketball, etc.) a field goal is awarded if the ball passes through the goal posts (or hoop in basketball).

It doesn't make a difference if the ball/puck enters dead center or just slips in. The score awarded is the same.

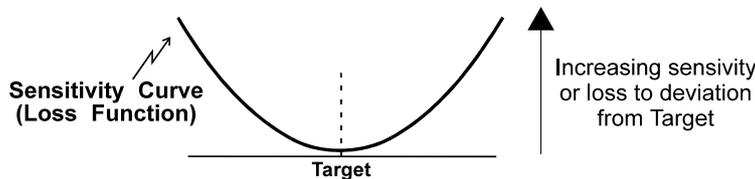
In manufacturing processes this means that everything within the specification limits are considered equally good, and everything outside equally bad.



This approach may be valid for discrete characteristics (e.g. the part has a clearance hole or not), but, when dealing with characteristics with a continuous response, this approach does not reflect how the customer reacts to different levels of the output.

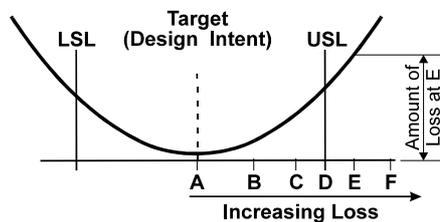
Without considering the specifications, it is possible to determine the customers sensitivity to deviations from the target (design intent). As the output deviates farther from the target, more and more customers will be able to «sense» that it is different than the design intent - primarily because it take more «effort» to use. In many cases we can attach a loss (in time, cost, efficiency, etc.) to each deviation increment level. This loss can be at the individual customer but also can be extended to loss to the organization and even society.

A typical sensitivity curve (loss function) can be shown to be quadratic in form.



There are two ways to analyze a loss function. The first is to compare it to the design intent and functional specifications.

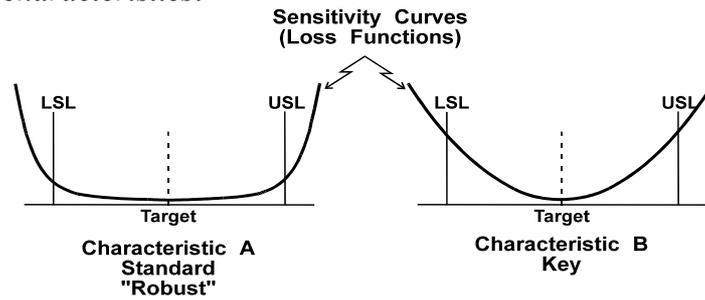
This shows that, in the eyes of the customer, there is functionally little difference between an output that is a «nudge» on one side of the specification limit and the other.



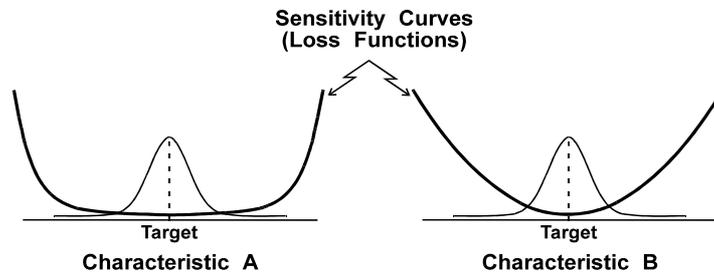
A comparison of the loss function to the specifications does provide us with a way to classify characteristics. In the figure below we can see that Characteristic A has a loss function that is relatively flat within the specification limits. This means that the customer will be insensitive to variation within specification. Since we are expected to produce all parts within specification, this characteristic satisfies the operational definition for robust.

A characteristic is called **Robust**  
if the customer is insensitive to the characteristic's expected variation.

Ideally this should be the classification for all characteristics. Consequently, these characteristics are also known as *standard product characteristics*.



One approach to assure all characteristics are robust is to establish the specification limits based on the loss function. Certainly we can set the limits so that the portion of the function within the specification limits is reasonable flat. This is equivalent to comparing the loss function with the process capability of candidate cost competitive processes during the design phase. Unfortunately, physical and manufacturing constraints may make it infeasible, at this time, to design a product and process with all characteristics being robust. That is, with a specific design and the available (cost competitive) processes, the customer may be so sensitive to deviations from design intent that the expected process variation (process capability) encompasses increasing loss.

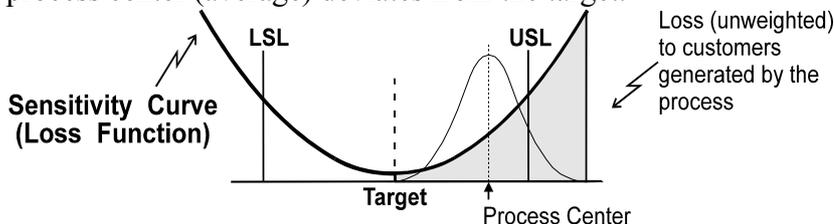


If it is economically infeasible to make all the characteristics robust with the present design, we can

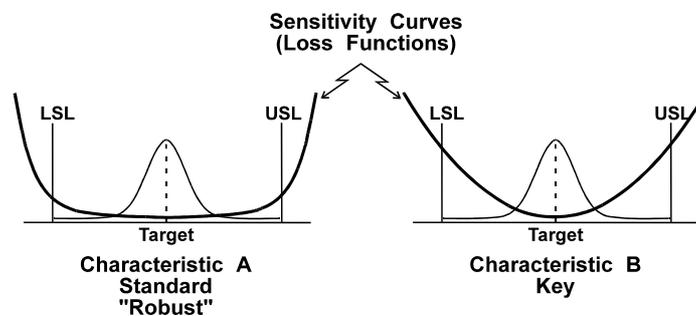
- redesign the product to eliminate or mitigate the area of concern
- use the present design and
  - 1) establish the specification limits based on the expected process performance; i.e. with non-robust characteristics - if the customer is willing to accepted the additional loss
  - 2) establish the specification limits to the maximum customer acceptable loss and sort production (*note: this option is a lose-lose position for producer and customer and is usually not acceptable to the customer*).

### Process Control and Continual Improvement

The sensitivity curve also provides direction in the control of the production process. If we compare the process to the loss function and the specification together we see that the total loss to the customer increases as the process center (average) deviates from the target.



That is, the optimum setting for the process (minimum loss to the customer) is when the process average is at the target.



If the characteristic is robust we have the flexibility to permit economically allowable special causes such as tool wear, multiple set-ups, etc. (see chapter xx). Continual improvement, in these situation, would be to focus on productivity and the management of variation with efforts. Efforts to reduce of variation would be a waste of time since the customers (internal and final) are insensitive to variation within the specification limits.

The focus of continual improvement efforts should be to increase the value to the customer.

For non-robust characteristics the focus of continual improvement should be the reduction of variation. These are the key characteristics to increase customer satisfaction (reduce loss) through variation reduction.

#### **Determination of Sensitivity Curves.**

Sensitivity curves can be determined by:

- 1) subject matter expertise;
- 2) multi-disciplinary team consensus (including subject matter experts);
- 3) use of probabilistic and statistical methods.

All three approaches can provide valid sensitivity curves. The last approach, probabilistic and statistical methods, is preferred since it provides consistent quantifiable results with predictable risks.

It would be unrealistic to expect a design team to determine sensitivity curves using probabilistic methods for all characteristics on a new design. The effort required would be overwhelming and not very cost effective. The multi-disciplinary team should identify, using subject matter knowledge and field information on similar product/processes, characteristics which are critical to the function of the product and process or suspect non-robust characteristics. These characteristics are the candidates for analysis by probabilistic methods. The rest would be classified as *standard characteristics by consensus*.

It is important to document not only the characteristic's classification but also how it was determined. This information is used in carry-over designs to increase the effectiveness of the total design effort. For example, engineer tests on a characteristic which has previous analysis by probabilistic methods can focus on verifying the previous analysis by probabilistic methods instead of assuming no knowledge and starting from scratch. This will optimize the test size and time and allow opportunities for additional studies on other characteristics.

#### **Summary**

The management of variation is closely related to the determination and definition of the product requirements to the characteristic level. The knowledge of the interrelationships among the functional specifications and customer sensitivities to variation enable us to optimize our development, control, and improvement efforts.

**Э.М. Карташов**

Московская государственная академия тонкой химической  
технологии им. М.В. Ломоносова

# СОВРЕМЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ РЕШЕНИИ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ОБЛАСТИ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ И С РАЗНОРОДНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ЛИНИЯХ

Круг вопросов, при рассмотрении которых приходится сталкиваться с уравнением нестационарной теплопроводности в областях с движущимися во времени границами, весьма широк и включает как случаи, когда движение границ задано, так и более сложные, когда это движение требуется определить из дополнительных условий задачи (задачи Стефана и более сложные (типа Стефана) для уравнения теплопроводности со свободной границей [1]). Задачи указанного типа представляют особый интерес для теории роста кристаллов; теории плотин; механики почв; термике нефтяных пластов; теории фильтрации; теории колебаний; в электродинамических задачах; в проблеме теплового удара концентрированными потоками энергии; в теории прочности и т.д. Сложность аналитического решения задач теплопроводности (диффузии) в области с движущимися границами определяется тем, что к этому типу задач непосредственно неприменимы классические методы дифференциальных уравнений математической физики. Оставаясь в рамках этих методов, не удастся согласовать решение уравнения теплопроводности с движением границ области. Последнее в равной степени характерно и для краевых задач нестационарного и стационарного переноса с разнородными граничными условиями на линиях. Для нахождения аналитических решений указанных классов задач переноса необходимы специальные методы или модификация известных подходов. Изложение результатов, накопленных в этой области аналитической теории теплопроводности твердых тел, дано в недавних обзорах автора [1, 2], его книге [3], и серии статей [4 – 6]. В настоящем докладе (лекции) обзорного характера излагается современное состояние проблемы и ее дальнейшее развитие. Дается краткая характеристика метода, его особенности, область приложения (конкретные законы движения границы и конкретные области с соответствующими типами разнородных граничных условий). Формулируются текущие проблемы по каждому из аналитических подходов и новые направления исследований в указанной области тепло- и массопереноса.

## 1 Области с движущимися границами

Метод функций Грина, дающий интегральное представление аналитического решения тепловой задачи через функцию влияния, отличен от классического подхода в нецилиндрических областях. Основное отличие – в соответствующей формулировке граничных условий для функций Грина в областях с движущимися границами. При этом не сохраняется и физический смысл ряда краевых условий для функций Грина в нецилиндрических областях, что может приводить к ошибочным результатам при механическом переносе метода функций Грина с классических (канонических) областей на области с движущимися границами.

Метод интегральных уравнений для областей с равномерно движущейся границей применяется при построении соответствующей функции Грина в указанной области, однако, может быть использован и при решении исходной задачи. Решение задачи имеет вид обобщенного теплового потенциала простого слоя с неизвестной плотностью. Операционная форма потенциала позволяет установить вид (в пространстве изображений) плотности потенциала, что позволяет получить решение задачи в наиболее компактном виде, отличном от известных ранее решений для указанной области. Метод может быть распространен на более сложные законы движения границы.

Метод обобщенных рядов применим при рассмотрении области с границей, движущейся по параболическому закону. Решение тепловой задачи имеет вид функционального ряда по обобщенным степеням временной переменной, коэффициенты которого находятся из удовлетворения граничным условиям задачи – функций общего вида, включая рассмотренные ранее частные случаи.

Метод функциональных преобразований основан на введении подвижной системы координат, в которой преобразованная исходная тепловая задача допускает применение классических подходов для широкого класса законов движения границы, включая принципиально новые случаи. Метод позволяет рассмотреть достаточно общие законы движения границы при общем виде краевых функций в постановке задачи.

Метод дифференциальных рядов для областей с произвольно движущейся границей основан на использовании производных любого порядка от краевых функций задачи и закона движения границы.

Метод особенно эффективен при рассмотрении обратных задач Стефана и дает возможность получать замкнутые решения для ряда законов движения границы. Метод применим для ограниченных областей вырожденного типа (стягивающихся в точку в начальный момент времени). При рассмотрении обратных задач могут быть рассмотрены области невырожденного типа.

Метод контурного интегрирования (обобщающий классические интегральные преобразования на случай областей с движущимися границами) применим при рассмотрении нецилиндрических областей вырожденного и невырожденного типа для классических постановок краевых задач теплопроводности, а также задач Стефана прямых и обратных и более общих краевых задач для уравнений теплопроводности со свободной границей. Метод позволяет рассмотреть достаточно общие краевые функции в исходной постановке задачи и для задач стефановского типа получить аналитические решения в новых функциональных формах (отличных от известных решений в частных случаях).

## **2 Смешанные граничные задачи теплопроводности**

Наличие разнородных граничных условий (например, температуры на одной части поверхности твердого тела, теплового потока – на другой) приводит к тому, что к этому типу задач непосредственно неприменимы методы разделения переменных и интегральных преобразований Фурье. Развитие этой проблемы до последнего времени шло, по-видимому, следующим образом [7]. С одной стороны, точные решения задач подобного типа удалось получить при помощи удачных догадок, искусственных приемов (например, используя разрывные интегралы Вебера от бесселевых функций), причем для весьма ограниченного числа областей и для частного вида граничных условий (постоянные первого рода на линии, теплоизоляция вне ее). С другой стороны, для решения указанных задач совершенствовались и развивались новые методы математической физики, модифицирующие известные математические подходы на новый класс задач. Так, один из эффективных подходов – метод парных интегральных уравнений и парных сумматорных рядов – представил собой по существу обобщение классического метода разделения переменных применительно к уравнению теплопроводности с разнородными граничными условиями. Метод факторизации Винера-Хопфа дал возможность преодолеть значительные технические трудности, возникающие при решении смешанных задач теплопроводности с помощью интегральных преобразований Фурье, Лапласа или Меллина. Методы решения задач линейного сопряжения граничных значений кусочно-аналитических функций позволили получить эффективные решения задач стационарной теплопроводности с разнородными граничными условиями на линиях, на плоскости и с заданными условиями на бесконечности, там, где классические подходы теории потенциала оказались бессильными. Таким образом, при рассмотрении смешанных граничных задач теплопроводности могут быть использованы три основных подхода: метод функции комплексного переменного; метод доопределения, приводящий к задачам римановского типа; метод Винера-Хопфа. Установлена возможность аналитического представления одного и того же решения в различных классах функций в зависимости от выбранного подхода.

## **3 Классические области канонического типа**

Для ограниченных областей канонического типа с неподвижными границами аналитическая теория теплопроводности располагает хорошо разработанной теорией. Однако и для этих случаев проблема не может считаться закрытой. В докладе предлагаются улучшенные аналитические решения, весьма удобные при рассмотрении многих практических вопросов теплофизики: расчеты теплофизических постоянных на основе решения обратных задач; определение времени прогрева; расчет времени выхода на стационарную фазу и т.д. [8 – 9], а также при рассмотрении тепловых задач для уравнений гиперболического типа с учетом конечной скорости распространения тепла [10 – 11].

## **4 Приближенные аналитические методы**

Приближенные аналитические методы представляют для теплофизики также большой интерес, как и точные методы. К ним относятся методы: Л.В. Канторовича и Бубнова-Галеркина; дополнительных граничных условий

на основе интеграла теплового баланса; конечных элементов; осреднений функциональных поправок; неопределенных коэффициентов; разложений по малому параметру (пикаровский процесс) и др. В то же время следует заметить, что применение этих приближенных методов не намного облегчает техническую возможность использования найденных решений, также достаточно громоздких и требующих применения ЭВМ.

Вероятное развитие аналитической теории указанного выше класса задач нестационарного теплопереноса будет идти в направлении поиска новых и совершенствования (модификации) уже имеющихся подходов, приводящих к точным решениям в виде удобных для обработки функциональных конструкций. На этом пути, вероятно, возможны и новые физические результаты, относящиеся к указанному классу задач.

### Список литературы

- 1 Карташов Э.М. Аналитические методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности в области с движущимися границами / Э.М. Карташов // Известия РАН. Энергетика. 1999. № 5. С. 3 – 35.
- 2 Карташов Э.М. Аналитические методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности в областях с движущимися границами / Э.М. Карташов // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 1 – 24.
- 3 Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. М.: Высшая школа. 2001. 540 с.
- 4 Карташов Э.М. Метод функций Грина при решении краевых задач для уравнений параболического типа / Э.М. Карташов // ДАН. 1996. Т. 351, № 1. С. 32 – 36.
- 5 Карташов Э.М. Новые интегральные соотношения для аналитических решений уравнений параболического типа в нецилиндрических областях / Э.М. Карташов // ДАН. 2000. Т. 374, № 2. С. 168 – 172.
- 6 Карташов Э.М. Новые интегральные представления для аналитических решений уравнений параболического типа в нецилиндрических областях / Э.М. Карташов // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 5. С. 826 – 836.
- 7 Карташов Э.М. Аналитические методы решения краевых задач теплопроводности с разнородными граничными условиями на линиях / Э.М. Карташов // Известия РАН. Сер. Энергетика и транспорт. 1986. № 5. С. 125 – 149; № 6. С. 116 – 129.
- 8 Карташов Э.М. Метод интегральных преобразований в аналитической теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов // Известия РАН. Энергетика. 1993. № 2. С. 99 – 127; 1993. № 3. С. 106 – 125.
- 9 Рудобашта С.П. Диффузия в химико-технологических процессах. / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. М.: Химия. 1993. 210 с.
- 10 Карташов Э.М. Новые интегральные соотношения для аналитических решений гиперболических моделей переноса / Э.М. Карташов // ДАН. 2002. Т. 384, № 1. С. 17 – 21.
- 11 Карташов Э.М. Теория нестационарного переноса тепла на основе уравнений гиперболического типа / Э.М. Карташов, О.И. Ремизова // Известия РАН. Энергетика. 2002. № 3. С. 146 – 156.
- 12 Кудинов В.А. Теплоперенос и термоупругость в многослойных конструкциях / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов и др. М.: Энергоатомиздат. 1997. 425 с.

### *С.П. Рудобашта*

Московский государственный агроинженерный университет  
им. В.П. Горячкина

## **РОЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ДИСПЕРСНЫХ ВЫСУШИВАЕМЫХ ПРОДУКТОВ**

Основными параметрами, которые должны контролироваться при сушке дисперсных материалов, являются влажность и температура взаимодействующих фаз. В настоящее время с помощью существующих датчиков относительно легко контролируются такие параметры, как температуры обеих фаз

и влажность сушильного агента. Влажность высушиваемого материала гораздо труднее поддается экспресс-контролю, а точность такого измерения часто оказывается недостаточной для надежного управления процессом. Поэтому на первый план выступают косвенные методы контроля, знание которых может дать информацию о конечной влажности высушиваемого продукта. Связь этих параметров с конечными значениями температуры и влажности высушиваемого материала может быть осуществлена через математическую модель процесса, центральным (и наиболее трудным в описании) звеном которой является кинетика – описание взаимосвязанного тепломассообмена при сушке частиц дисперсного материала в аппарате. Вышеизложенное определяет роль математического моделирования при контроле и управлении качеством высушиваемых продуктов.

Наиболее простым соотношением между конечными значениями температуры и влажности высушиваемого материала является прямая эмпирическая зависимость между ними. В целях обобщения ее, следуя [1], часто представляют в виде зависимости  $Rb = f(\bar{u})$  [2]. Более глубокая связь между параметрами дисперсного материала и сушильного агента, позволяющая описывать их изменение в ходе сушки, устанавливается математической моделью взаимосвязанного тепломассопереноса.

Общую задачу описания кинетики сушки дисперсного материала в непрерывно действующем аппарате целесообразно декомпозировать на два уровня: микрокинетический – описание кинетики сушки единичной гранулы или его порции в дифференциально малом объеме аппарата. На макрокинетическом уровне описывается кинетика сушки всей совокупности частиц в аппарате с привлечением уравнений материального и теплового баланса и гидродинамики потоков.

Возможны два подхода в математическом моделировании процесса сушки дисперсных материалов в непрерывнодействующих аппаратах. Первый из них основан на использовании подвижной (лагранжевой) системы координат, которая связана с частицей перемещающейся по аппарату. Во втором случае система координат фиксирована на корпусе аппарата (эйлерова система координат).

Для описания микрокинетики в первом периоде сушки используется уравнение массоотдачи. При описании микрокинетики второго периода сушки при первом подходе появляется возможность использовать систему дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса, записываемых для единичной частицы.

В соответствии с представлениями термодинамики необратимых процессов эта система может быть представлена в виде [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 T + K_{12} \nabla^2 \theta + K_{13} \nabla^2 p; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 T + K_{22} \nabla^2 \theta + K_{23} \nabla^2 p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 T + K_{32} \nabla^2 \theta + K_{33} \nabla^2 p, \quad (3)$$

где  $K_{ij}$  – кинетические коэффициенты ( $i, j = 1, 2, 3$ ).

Математические модели микрокинетики на основе уравнений (1) – (3) не получили сколько-нибудь значительного применения на практике – ввиду сложности расчета или экспериментального определения потенциала массопереноса  $\theta$ .

На практике более приемлемой оказалось система уравнений, которая в качестве потенциала массопереноса использует влагосодержание материала, имеющая вид [1]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla [k(u, t)(\nabla u + \delta_t(u, t)\nabla t)]; \quad (4)$$

$$c_m(u, t)\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla(\lambda(u, t)\nabla t) + \varepsilon^* r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Однако, большое количество теплофизических коэффициентов, входящих в эти уравнения, и их зависимость от потенциалов переноса, сложность их определения, несоответствие формы частицы классической форме (пластина, цилиндр, шар) имеют следствием редкое применение системы уравнений (4), (5) в полном виде на практике (примеры применения можно найти в [4]).

В некоторых случаях ситуация упрощается, что делает возможным и целесообразным практическое использование этого описания микрокинетики. К числу таких случаев относится глубокая сушка гранулированных полимеров. Этот процесс отличается рядом особенностей [4], которые приводят к тому, что

вместо системы взаимосвязанных уравнений (4) и (5), микрокинетику описывает дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla(D(u, t)\nabla u) \quad (6)$$

при граничном условии массообмена первого рода.

Для описания микрокинетики на основе уравнения (6) необходимы данные по коэффициентам диффузии влаги в материале  $D(u, t)$  и равновесному влагосодержанию  $u_p = f(\varphi, t)$ , которые в настоящее время получены для всех практически значимых полимеров [4, 5], что обеспечивает реализацию этой модели на практике.

В большинстве случаев микрокинетику процесса во втором периоде сушки описывают на основе полуэмпирических уравнений различного вида, из которых наиболее часто используется уравнение скорости сушки вида

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p), \quad (7)$$

Отметим, что уравнение (7) применимо как при первом подходе в описании микрокинетики (в этом случае оно описывает кинетику сушки единичной гранулы), так и при втором – тогда оно описывает кинетику сушки материала в дифференциально малом объеме аппарата.

При описании макрокинетики микрокинетические уравнение дополняется уравнениями материального и теплового баланса аппарата и уравнениями, описывающими гидродинамику потоков. При использовании подвижной системы координат учет полидисперсности частиц и их неоднородности по времени пребывания в аппарате осуществляется обычно на основе соотношения

$$\bar{\bar{u}} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f(R) \int_0^{\infty} \bar{u}(R, \tau) f(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где  $f(R)$ ,  $f(\tau)$  – дифференциальные функции распределения частиц по их размерам  $R$  и по времени пребывания в аппарате  $\tau$  соответственно;  $\bar{\bar{u}}$  – конечное влагосодержание всей массы продукта на выходе из аппарата.

Проведенные в [5] исследования показали необходимость учета рассматриваемых неоднородностей при глубокой сушке гранулированных полимеров. Полученная в [5] информация позволяет осуществлять расчет с учетом функции  $f(R)$  в зависимости от вида гранулята полимера и способа его получения и с учетом функции  $f(\tau)$  в зависимости от конструктивных характеристик аппарата.

При использовании неподвижной системы координат (второй подход) макрокинетическая модель записывается обычно в форме уравнения конвективной диффузии: для описания первого периода сушки – по газовой фазе, а для описания второго периода сушки – по твердой фазе. В этом случае микрокинетическое уравнение «встраивается» в уравнение конвективной диффузии. Учет продольного перемещения той фазы, по которой записывается уравнение конвективной диффузии, удобно проводить на основе диффузионной модели гидродинамической структуры потока. Запишем в качестве примера эту модель по твердой фазе, следуя [7], в виде

$$v_{\tau} \frac{d\bar{u}}{dx} = D_{\text{пр.т}} \frac{d^2 \bar{u}}{dx^2} - K(\bar{u} - u_p), \quad 0 < x < \infty; \quad (9)$$

$$\bar{u}(x) = U_{\text{н}} + \frac{D_{\text{пр.т}}}{v_{\tau}} \frac{d\bar{u}}{dx}, \quad x = 0; \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (11)$$

Решение задачи (9) – (11) при  $v_{\tau}$ ,  $D_{\text{пр.т}}$ ,  $K$ ,  $u_p = \text{const}$  имеет вид [7]

$$E = \frac{Pe_{\text{пр.т}}}{Pe_{\text{пр.т}} - k} \exp(kz), \quad (12)$$

где 
$$k = \frac{Pe_{пр.т} - \sqrt{Pe_{пр.т}^2 + 4\tilde{\beta}}}{2}, \quad k < 0; \quad (13)$$

$\tilde{\beta} = Kl^2/D_{пр.т}$ ;  $z = x/l$ ;  $l$  – произвольный размер, принятый за масштаб длины, м.

При необходимости учета изменения параметров процесса по длине потока используются зональный метод расчета, реализация которого при данном подходе рассмотрена в [7].

Проведенный анализ показывает современные направления развития математических моделей при сушке дисперсных материалов, применение которых важно для решения задач контроля и управления качеством высушиваемых продуктов.

*Обозначения:*  $c$  – удельная теплоемкость Дж/(кг·К);  $D$ ,  $D_{пр}$  – коэффициенты молекулярной и продольной диффузии соответственно, м<sup>2</sup>/с;  $k$  – коэффициент массопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $K$  – модифицированный коэффициент массопередачи по твердой фазе (при  $K = \text{const}$  – коэффициент сушки), 1/с;  $p$  – давление, Па;  $u$  – локальное влагосодержание в частице, кг/(кг сух. м-ла);  $R$  – характерный размер частицы, м;  $r^*$  – теплота испарения влаги, включая теплоту десорбции, Дж/кг;  $\bar{u}$  – среднее по объему частицы или по дифференциально малому объему аппарата влагосодержание материала, кг/(кг. сух. м-ла);  $t$ ,  $T$  – температура, соответственно °С и К;  $v$  – скорость, м/с;  $x$  – координата, м;  $\delta_t$  – относительный коэффициент термовлагопроводности, 1/К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\theta$  – потенциал массопереноса, град;  $E = (\bar{u}(z) - u_p) / (\bar{u}_H - u_p)$  – относительное влагосодержание;  $Pe_{пр} = v \cdot l / D_{пр}$  – число Пекле продольного перемешивания;  $Rb = (c_m \cdot d \bar{t}_m) / (r^* \cdot d \bar{u})$  – число Ребиндера.

*Индексы:* м – материал; н – начальный; пр. – продольное перемешивание; р – равновесный; с – сушильный агент; т – твердая фаза.

### Список литературы

- 1 Лыков А.В. Теория сушки: Изд. 2-е. / А.В. Лыков М.: Энергия. 1968. 470с.
- 2 Куц П.С. Обобщенное уравнение кинетики процесса конвективной сушки влажных материалов / П.С. Куц, В.Я. Шкляр, А.И. Ольшанский // ИФЖ. 1987. Т. 53, № 1. С. 90 – 96.
- 3 Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов М.–Л.: Госэнергоиздат. 1963. 535 с.
- 4 Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. М.: Химия. 1980. 248 с.
- 5 Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки гранулированных и пленочных полимерных материалов: Дис. ... докт. техн. наук / В.М. Дмитриев. Тамбов. 2003. 460 с.
- 6 Бабенко В.Е. Дис. ... д-ра. техн. наук. ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1975.
- 7 Рудобашта С.П. Продольное перемешивание твердой фазы и тепломассообмен в непрерывнодействующем аппарате с псевдооживленным слоем / С.П. Рудобашта и др. // Промышленная теплотехника. 2002. Т. 24, № 1. С. 39 – 44.

***С.Е. Буравой, Е.С. Платунов, В.В. Курепин***

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДАМИ МОНОТОННОГО РЕЖИМА

В нашей стране в 30-е годы прошлого века наметилось бурное развитие народного хозяйства. Промышленность стала проявлять большой интерес к научным разработкам. Возникла потребность в экспрессных, дешевых в изготовлении и простых в обслуживании приборах для измерения тепловых свойств вновь создаваемых технических материалов. В связи с этим в России несколько раньше, чем в

Европе, специалисты в области теплофизических измерений обратили внимание на начальную и регулярную стадии нестационарных тепловых процессов. Первопроходцами в этих научных поисках стали видные российские теплофизики Г.М. Кондратьев, А.В. Лыков и А.Ф. Чудновский. Благодаря их деятельности в нескольких институтах страны возникли самостоятельные научные школы, занимающиеся разработкой методов начальной стадии (*нестационарных методов*), методов регулярного режима первого рода (*регулярных методов*) и методов регулярного режима второго рода (*квазистационарных методов*). Особую известность при исследовании теплофизических свойств получили методы регулярного теплового режима, разработанные Г.М. Кондратьевым и его учениками, так как оказались наиболее простыми в реализации.

В последующие десятилетия развитие методов регулярного режима шло по нескольким направлениям. В частности, изыскивались новые области применения методов, использовались очередные достижения электроизмерительной техники, совершенствовалась конструкция калориметрических ячеек. В процессе этих работ окончательно выяснилось, что регулярные методы, как и методы начальной стадии, целесообразно использовать в основном при измерениях вблизи комнатной температуры, где естественным образом обеспечивается изотермичность среды и начального состояния образцов. Однако вдали от нормальных климатических условий они, к сожалению, перестают отличаться от стационарных методов. Для исследования тепловых свойств в широкой области температур более перспективными оказались квазистационарные методы (регулярные методы второго рода), линейная теория которых была разработана А.В. Лыковым.

К сожалению, их широкому внедрению мешали две причины: сложность реализации линейного разогрева и отсутствие надлежащего теоретического обоснования, позволяющего корректно учитывать произвольную температурную зависимость теплофизических свойств образца. Поэтому возникла идея объединить положительные качества регулярных и квазистационарных методов, теоретически обосновав возможность их применения в условиях монотонного (близкого к линейному) изменения температуры, когда удастся равноправно учитывать как нелинейность уравнения теплопроводности, так и изменение скорости изменения температуры. Эти работы впервые были начаты в 60-х гг. XX века в ЛИТМО на кафедре теплофизики, в созданной Г.М. Кондратьевым проблемной лаборатории. Именно там авторам этой лекции удалось создать группу методов, синтезировавших в себе положительные качества регулярных и квазистационарных методов [1–4]. На основе этих методов позднее была разработана группа приборов, которые в совокупности обеспечили измерения в области температур от 4,2 до 3000 К. Наибольшую известность среди них получили приборы, предназначенные для измерений в интервале минус 100 ... 400 С. В 70-х гг. XX века они были переданы на доработку в Ленинградское ГСКТБ теплофизического приборостроения и до 1992 г. выпускались серийно, в заводском оформлении (г. Актюбинск, Казахстан).

Методы измерения теплофизических свойств в условиях монотонного разогрева (охлаждения) часто называют *динамическими методами*. Они позволяют определять теплофизические свойства образца как функции температуры, поэтому опираются на *нелинейное* уравнение теплопроводности. Их физическую основу составляют линейные методы регулярного режима второго рода, с их относительно простыми расчетными формулами. Кроме того, обычно удается использовать образцы, имеющие форму пластинок, цилиндров и коротких стержней, в которых принудительно формируется практически одномерное температурное поле.

Особое место среди динамических методов занимают те, в которых образцом являются тонкие стержни (проволочки, ленты и трубки, заполненные исследуемым веществом). При разогреве и охлаждении таких образцов легко удается сохранять их изотермичность, поэтому такие методы широко используют для экспрессного определения теплоемкости как функции температуры, причем как в области криогенных и низких, так умеренных и высоких температур (от 6 до 2000 К). Расчетные формулы таких динамических методов остаются строгими при произвольном характере зависимости теплоемкости образца от температуры.

В динамических методах, предназначенных для определения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости, образцам обычно придают форму короткого цилиндра или диска. Основными элементами тепловой ячейки при этом являются две плотно прижатые друг к другу пластины, разогреваемые (охлаждаемые) слабо меняющимся аксиальным тепловым потоком. Наибольшее распространение нашли те методы, в которых первая пластина имеет относительно низкую теплопроводность, а вторая выполнена из металла и сохраняет в опыте практически равномерное температурное поле. Выделим три основных варианта таких тепловых ячеек.

*Вариант 1.* Металлическая пластина (ядро) 2 является постоянной деталью ячейки и имеет известные параметры  $c_2, \rho_2, h_2$ . Пластина (собственно образец) 1 имеет толщину  $h_1$ . Ячейка обеспечивает монотонный разогрев системы образец – ядро заданным тепловым потоком  $q_0(\tau)$ . В опыте регистрируются тепловой поток, поглощаемый обеими пластинками, перепад температуры в образце  $\vartheta_1(\tau)$  и скорость разогрева ядра  $b(\tau) = dt_2/d\tau$ . Ячейка позволяет определять одновременно теплопроводность и теплоемкость образца. Расчетные формулы:

$$\lambda_1 = \frac{h_1}{2\vartheta_1(\tau)} [q_0(\tau) + c_2\rho_2h_2b(\tau)], \quad (1)$$

$$c_1 = \frac{1}{\rho_1h_1} \left[ \frac{q_0(\tau)}{b(\tau)} - c_2\rho_2h_2 \right]. \quad (2)$$

*Вариант 2.* Пластина 2 тщательно защищена от теплообмена со средой и выполняет функции изотермического ядра с известной теплоемкостью  $C_2$ . Пластина (образец) 1 имеет относительно малую толщину. В опыте регистрируются перепад температуры в образце  $\vartheta_1(\tau)$  и скорость разогрева металлического ядра  $b(\tau) = dt_2/d\tau$ . Выполняется ограничение

$$c_1\rho_1h_1S \leq 10C_2. \quad (3)$$

В данном варианте теплофизические измерения существенно упрощаются, так как отпадает необходимость иметь самостоятельный узел для задания и регистрации теплового потока  $q_0$ . Эту функцию берет на себя металлическое ядро. Но при этом метод теряет комплексность, позволяя независимо определять только теплопроводность. Исходная расчетная формула имеет вид

$$\lambda = \frac{h_1C_2}{S} \frac{b(\tau)}{\vartheta_1(\tau)} (1 + \Delta\sigma_c), \quad (4)$$

где  $S$  – площадь образца (пластинки 1);  $\Delta\sigma_c$  – поправка на теплоемкость образца,  $\Delta\sigma_c = C_1/2C_2$ ,  $C_1 = c_1\rho_1h_1S$ .

*Вариант 3.* Выполняются все ограничения предыдущего варианта, но меняются ролями пластинка и ядро, а именно – пластинка становится постоянной деталью тепловой ячейки, выполняя функцию тепломера, а металлическое ядро – исследуемым образцом с исследуемой теплоемкостью. Параметры пластинки 1 предполагаются известными. Как и прежде, в опыте регистрируются только перепад температуры в образце  $\vartheta_1(\tau)$  и скорость разогрева ядра  $b(\tau) = dt_2/d\tau$ .

В этом варианте определяется удельная теплоемкость ядра

$$c_2 = \frac{\vartheta_1(\tau)}{\rho_2h_2b(\tau)} \frac{\lambda_1}{h_1} (1 + \Delta\sigma_c). \quad (5)$$

Более детальное описание динамических тепловых ячеек, созданных авторами и их учениками к 90-м гг. XX века, приведено в монографиях [1–3]. В этих работах и оригинальных статьях подробно исследованы все побочные факторы, сопровождающие работу каждой тепловой ячейки. Важно отметить, что созданные тепловые ячейки в своей совокупности охватывают обширную область температур и самые различные группы веществ и материалов. Не останавливаясь на конкретном описании созданных динамических методов и их тепловых ячеек, обратим внимание на их общий теоретический фундамент.

Его суть сводится к тому, что все методы монотонного разогрева предназначены для определения теплофизических характеристик как функций температуры. Поэтому все они нуждаются в нелинейном обосновании.

Проблема заключается в том, что общие аналитические приемы решения нелинейного уравнения теплопроводности отсутствуют. В предыдущих работах авторов было показано, что для обоснования динамических методов можно воспользоваться известным в математике способом последовательных

приближений. Указанный способ интересен тем, что позволяет в условиях теплофизических измерений контролировать температурные границы линеаризации уравнения теплопроводности и при необходимости вводить в расчетные формулы аналитические поправки на нелинейность.

Исходное одномерное нелинейное уравнение теплопроводности в применении к методам монотонного режима имеет вид

$$\operatorname{div}[\lambda(t)\operatorname{grad}t]=c(t)\rho(t)b(r,\tau). \quad (6)$$

Допущение о монотонности изменения коэффициентов  $\lambda(t)$ ,  $c(t)$ ,  $\rho(t)$  и  $a(t)$  уравнения (6) позволяет воспользоваться разложением их в ряд Тейлора по перепаду  $\vartheta(r,\tau)$ , отсчитываемому от базовой температуры  $t_0(\tau) = t(x_0,\tau)$  в заданном сечении  $x_0$  образца. Это разложение для интересующих нас теплофизических коэффициентов имеет вид

$$i(\vartheta) = i_0(1 + k_i\vartheta + n_i\vartheta^2 + \dots). \quad (i = \lambda, c, \rho, a). \quad (7)$$

Дополним его аналогичным разложением для поля скоростей  $b(r,\tau)$

$$b(\vartheta) = b_0(1 + k_{br}\vartheta + n_{br}\vartheta^2 + \dots). \quad (8)$$

Примем, что в пределах перепада температуры  $\vartheta(r, \tau)$  обеспечивается хорошая сходимость разложений (7), (8), т.е. выполняются условия

$$|k_i\vartheta| \leq 0,10, \quad |n_i\vartheta^2| \leq 0,010, \quad i = \lambda, c, \rho, a, b. \quad (9)$$

С учетом принятых ограничений уравнение теплопроводности (6) для полей  $\vartheta(r, \tau) = t(r, \tau) - t(0, \tau)$ , отсчитываемых от температуры  $t(0,\tau)$  в базовой точке, преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{b_0}{a_0} + \left[ (k_{br} - k_a) \frac{b_0}{a_0} - k_\lambda \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где  $b_0 = b(0,\tau)$ ;  $t_0 = t(0,\tau)$ ;  $a_0 = a(t_0)$ ;  $\lambda_0 = \lambda(t_0)$ .

Способ последовательных приближений предполагает поэтапную линеаризацию дифференциального уравнения. На первом этапе отыскивается решение уравнения с исключенными из него нелинейными членами. Затем найденное решение используется для линеаризации поправочных членов исходного уравнения. На втором этапе решается преобразованное уравнение. В полученном решении отдельно группируются основные и поправочные члены. Поправочные члены при необходимости могут включаться в расчетные формулы в виде аналитических поправок, но чаще всего используются для установления рабочих границ линейного решения. В последнем варианте способ последовательных приближений выступает гарантом использования линейных методов монотонного разогрева для определения теплофизических коэффициентов как функций температуры. Наиболее важные варианты решения уравнения теплопроводности (6) подробно рассмотрены в работах [1 – 3]. Обобщая их, можно сделать следующие выводы.

В *динамических  $\lambda$ -калориметрах* проблему учета нелинейностей удастся решить весьма просто. Для этого достаточно относить значение теплопроводности к температуре в центральном сечении образца.

В *динамических  $c$ -калориметрах* проблема устранения поправок на нелинейность решается еще проще, так как сводится к созданию условий, обеспечивающих минимальную неравномерность температурного поля в образцах.

В *динамических  $a$ -калориметрах* проблема учета нелинейностей реально существует, так как перепад температуры внутри образца является непосредственно регистрируемым в опыте параметром, входящим в расчетные формулы, и его снижение ограничивается чувствительностью измерительной аппаратуры. Однако и в этих условиях поправку на нелинейность удастся уменьшать до величины первого порядка малости. В частности, при температурных перепадах, не выходящих за пределы 10 К, поправкой на нелинейность с погрешностью не более 3 % часто удается вообще пренебрегать.

Ограничения (9) являются универсальными условиями монотонности теплового режима опыта. Если они выполняются, то появляется возможность учитывать нелинейные факторы соответствующим набором аналитических поправок к расчетным формулам квазистационарных методов. Для большинства материалов условия (9) в области умеренных температур выполняются достаточно легко, если температурные перепады в образце не выходят за пределы  $\vartheta < 30 \dots 100$  К. Это означает, кстати, что условие монотонности при указанных перепадах не нарушается даже при двойном изменении скорости через каждые 300 ... 400 К изменения температуры образца. Такой режим опыта удастся легко осуществить без устройств автоматического регулирования, обязательных в методах линейного разогрева. Более того, становится очевидным, что устройства линейного разогрева в принципе не могут служить универсальным средством обеспечения исходных признаков квазистационарного режима, так как температурное поле образца даже при линейном разогреве его базовой точки будет неизбежно изменяться по причине температурной зависимости теплофизических характеристик исследуемого материала.

Среди многих других факторов, с которыми приходится считаться при реализации методов монотонного режима, обратим здесь внимание только на проявления контактных тепловых сопротивлений. При выборе оптимальных размеров образца следует стремиться, чтобы его тепловое сопротивление  $P = h/\lambda$  хотя бы на порядок превышало величину контактных сопротивлений  $2P_k$ .

$$h \geq 10\lambda(2P_k). \quad (11)$$

Переходя к перспективам дальнейшего развития динамических методов, отметим, что в последнее десятилетие эти методы измерения теплофизических свойств продолжали успешно совершенствоваться и развиваться. Это оказалось возможным в связи с существенными успехами современной электронной измерительной и вычислительной техники. Разработаны уникальные по своей чувствительности и быстродействию аналого-цифровые микропроцессоры. На их базе сейчас создаются специализированные измерительно-вычислительные устройства (*контроллеры*), способные управлять режимом работы тепловой ячейки, регистрировать по заданной программе показания нескольких температурных датчиков и тепломеров, а затем производить полную аналитическую обработку всей полученной в опыте экспериментальной информации.

Благодаря применению специализированных контроллеров динамические методы обнаружили два перспективных направления дальнейшего развития. Во-первых, появилась возможность использовать их для одновременного исследования температурной зависимости всего комплекса теплофизических свойств вещества. А это означает, что в перспективе можно физически более корректно исследовать материалы, свойства которых при нагреве и охлаждении изменяются необратимо. Во-вторых, появилась перспектива внедрить динамические методы в ранее недоступную область теплофизических измерений. Речь идет об исследовании кинетики тепловых процессов, которые происходят в структурно сложных многокомпонентных веществах при изменении их температуры. Примерами таких процессов являются структурные и фазовые превращения, которые происходят во влагосодержащих материалах, в частности, в пищевых продуктах, подвергающихся замораживанию и размораживанию. В зоне фазовых превращений температурная зависимость теплофизических свойств таких веществ резко возрастает. Их эффективная теплоемкость может изменяться в десятки раз в диапазоне нескольких кельвинов температурной шкалы. Конкретные достижения, полученные в этих двух новых направлениях развития динамических методов, будут темой отдельной лекции (автор работ – докторант СПбГУНиПТ И.В. Баранов).

В заключение упомянем еще одно новое направление работ нашего коллектива. Начаты исследования, целью которых является попытка внедрить в динамические методы идею локальной регуляризации тепловых процессов в ограниченной зоне массивного влагосодержащего образца, подвергающегося замораживанию или размораживанию.

### Список литературы

- 1 Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. Л.: Энергия. 1973. 144 с.
- 2 Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; Под общ. ред. Е.С. Платунова. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд. 1986. 256 с.

3 Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении / Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.

4 Platunov E.S. Instruments for Measuring Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat under Monotonic Heating / E.S. Platunov // Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods. Vol. 2. Recommended Measurement Techniques and Practices, Plenum Press. New York and London. 1992. P. 347 – 373.

## С Е К Ц И Я 1 S E C T I O N 1

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

### И ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ

### THERMOPHYSICAL SUPPORT OF HEAT AND MASS TRANSFER TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Лекции

---

*Б.А. Арутюнов, А.Б. Арутюнов*

Московская государственная академия тонкой химической  
технологии им. М.В. Ломоносова

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ НА ПОГРАНИЧНЫХ КРИВЫХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ – ПАР

Известно, что некоторые физические эффекты, определяющие конкретное значение какого-либо свойства вещества, присущи в одинаковой мере как жидкому, так и газообразному состояниям. Поэтому при изучении разности значений исследуемого свойства на пограничных кривых фазового перехода жидкость – пар влияние этих физических эффектов значительно ослабевает или исчезает.

Такой подход позволяет, например, исключить влияние диполь-дипольного взаимодействия, характеризующего дипольным моментом, и влияние ацентричности, представленной критерием Л.П. Филиппова (или Питцера).

При правильном выборе комплексов приведенных величин для исследуемых свойств можно надеяться получить единые обобщенные беспараметрические зависимости для различных групп веществ.

Определенные трудности связаны с выбором масштабов приведения как для термодинамических, так и транспортных свойств. Что касается аргумента, то используется рекомендация Л.П. Филиппова [1] об универсальности приведенного объема  $V''/V_k (\rho_k/\rho')$ . Подтверждением правильности выбора аргумента  $\rho_k/\rho'$  может служить тот факт, что  $\lambda \sim \rho [1]$ ,  $r \sim \rho^2 [2]$ .

Поиск масштабов приведения для разности свойств жидкости и пара на пограничных кривых насыщения предлагается провести следующим образом. На основании экспериментальной температурной зависимости какого-либо свойства  $\chi$  определяется такое значение температуры  $T^*$ , при котором величина  $\Delta\chi = |\chi' - \chi''|$  будет равна численному значению этого свойства в критической точке, т. е.

$$|\chi'(T^*) - \chi''(T^*)| = \chi(T_k). \quad (1)$$

Необходимо отметить, что не для всех свойств вещества можно найти  $T^*$ , чтобы выполнялось равенство (1). Так, например, для  $r$ ,  $\Delta S$ ,  $\sigma$  такая температура либо не была обнаружена, либо не существует вовсе. В то же время для плотности всех веществ эта температура существует. Отмечая особую роль плотности при исследовании свойств веществ,  $T^*$  определяли обработкой экспериментальных данных [3 – 9] этой величины в виде:

$$(\rho' - \rho'') / \rho_k = f_1(\rho_k/\rho') \quad (2)$$

или

$$(\rho' - \rho'') / \rho_k = f_2(\tau). \quad (3)$$

Результаты обработки экспериментальных данных [3 – 9] в виде (2) привели к единой обобщенной зависимости.

Значению  $\rho' - \rho'' = \rho_k$  в координатах  $(\rho' - \rho'') / \rho_k = f_2(\tau)$  соответствует  $\tau^* = T^*/T_k$ , равная  $0,98 \pm 0,005$ . Уменьшение  $\Delta\rho/\rho_k$  от единицы до нуля происходит при изменении  $\tau$  от 0,98 до 1, т.е. всего на 2 %, а интервал изменения  $\rho_k/\rho'$  составляет при этом 34 % (0,66 ... 1).

Результаты позволяют проверить правомерность правила прямолинейного диаметра. Напомним, что это правило утверждает, что  $(\rho' + \rho'')/2$  является линейной функцией температуры [11]:

$$\rho_{cp} = (\rho' + \rho'')/2 = A - BT, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – константы для данного вещества. При этом прямая, соответствующая уравнению (4), проходит через критическую точку.

Анализ результатов показывает, что если при  $\Delta\rho/\rho_k = 1$   $\rho_k/\rho' = 0,666 \dots$ , то  $(\rho' + \rho'')/2 = \rho_k$ . Кроме того при  $T = T_k$   $\rho' = \rho'' = \rho_k$  ( $\Delta\rho = 0$ ), а  $\rho_{cp} = \rho_k$ . Это означает, что на кривой функции  $\rho_{cp}(T)$  должны находиться, по крайней мере, две точки, в которых  $(\rho' + \rho'')/2 = \rho_k$ .

Процедура определения масштабов приведения для разности плотностей на пограничных кривых фазового перехода жидкость-пар осуществлялась следующим образом. По базовой функции  $\Delta\rho = \rho' - \rho'' = f(T)$ , которая аппроксимировалась в виде полинома, определялась температура  $T^*$ , при которой  $\Delta\rho = \rho_k$  ( $\Delta\rho/\rho_k = 1$ ). Найденная температура в базовой точке использовалась для определения масштабов приведения для других свойств: зависимости  $\Delta S(T)$ ,  $r(T)$ ,  $\sigma(T)$ ,  $\Delta\eta(T)$ ,  $\Delta\lambda(T)$  аппроксимировали аналогичным образом для нахождения значений  $\Delta S^*$ ,  $r^*$ ,  $\sigma^*$ ,  $\Delta\eta^*$ ,  $\Delta\lambda^*$ .

Дальнейшая процедура построения обобщенных зависимостей для конкретного свойства сводилась к обработке экспериментальных данных в виде:

- для разности плотности

$$(\rho' - \rho'') / (\rho' - \rho'')^* = \Delta\rho/\rho_k = f_\rho(\rho_k/\rho'); \quad (5)$$

- для разности энтропий

$$(S'''-S'')/(S''-S')^* = \Delta S/\Delta S^* = f_s(\rho_k/\rho'); \quad (6)$$

- для разности динамической вязкости

$$(\eta' - \eta'')/(\eta' - \eta'')^* = \Delta\eta/\Delta\eta^* = f_\eta(\rho_k/\rho'); \quad (7)$$

- для разности теплопроводности

$$(\lambda' - \lambda'')/(\lambda' - \lambda'')^* = \Delta\lambda/\Delta\lambda^* = f_\lambda(\rho_k/\rho'). \quad (8)$$

По формулам (5) – (8) были обработаны существующие к настоящему времени экспериментальные данные для одно-, двух-, многоатомных газов, воды, аммиака, углеводов, спиртов, эфиров, кислот, фреонов, щелочных металлов, ртути, неорганических жидкостей (хлориды, бромиды и йодиды) элементов III и IV групп периодической системы [3 – 9].

Полученные результаты показывают правильность предположений, выдвинутых при построении метода. Обработка экспериментальных данных по термодинамическим и транспортным свойствам различных веществ в виде (5) – (8) показала их удовлетворительная сходимость.

Если говорить о преимуществах зависимостей (5) – (8) перед существующими методами обобщения, где в качестве масштабов используются параметры критической точки, то следует отметить следующие:

а) состояние, отвечающие базовой температуре, находится на несколько градусов ниже  $T_k$ , что существенно упрощает экспериментальное определение масштабов приведения;

б) для термодинамических функций  $r$ ,  $\Delta S$ ,  $\sigma$ , найдены масштабы приведения (в критической точке они равны нулю);

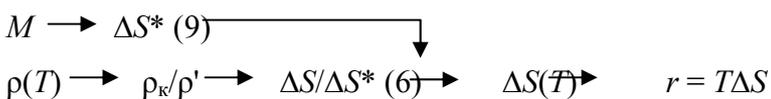
в) обработка данных по энтальпии и энтропии в предложенном методе освобождена от выбора начала отсчетов  $i$  и  $s$ ;

г) существенно расширен интервал изменения аргумента около критической области: 34 % шкалы при использовании  $\rho_k/\rho'$ , в то время как для  $\tau$  – всего 2 % шкалы.

Интересным представляется однозначная связь  $\Delta S^*$  с молекулярной массой вещества, полученная на основе обработки данных для 38 веществ, которая имеет вид

$$\Delta S^* = f(M). \quad (9)$$

Результаты обобщенной обработки (6) и (9) были аппроксимированы. Получены простые выражения для расчета  $\Delta S^*$  и  $\Delta S$ . Результаты аппроксимации позволяют определить теплоту парообразования вещества в зависимости от температуры при наличии данных по  $M$  и  $\rho(T)$ . Алгоритм расчета  $\Delta H$  следующий:



Для проверки декларируемого результата по предлагаемой методике были рассчитаны  $\Delta H$  различных веществ. Результаты этих расчетов дают хорошее совпадение между сравниваемыми данными.

Приведенный выше подход был использован для расчета теплоты парообразования для смесей, при этом все процедуры по расчету  $\Delta H$  для чистых веществ сохраняются. В этом случае для смеси необходимо определить  $M_{см}$  (среднюю молекулярную массу),  $\rho_{ксм}$ ,  $\rho'$ ,  $T_{см}$ , которые можно вычислить известными в литературе методами. Далее, используя уравнения (6) и (9), определяют  $\Delta S_{см}$ ,  $\Delta S^*_{см}$  и  $\Delta H_{см} = T_{см} \cdot \Delta S_{см}$ . Как и в случае чистых веществ имеет место хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Интересным представляется факт совпадения  $\Delta\lambda^*$  и  $\lambda_k$ ,  $\Delta\eta^*$  и  $\eta_k$ . К сожалению, такое сравнение можно провести только для ограниченного числа веществ.

### Список литературы

- 1 Филиппов Л.П. Подобие свойств / Л.П. Филиппов. М.: Изд-во МГУ, 1978. 259 с.
- 2 Неручев Ю.А. Дискретно-континуальная модель для прогнозирования равновесных свойств органических жидкостей / Ю.А. Неручев. Курск: Изд-во Курск. гос. пед. ун-та, 2001. 25 с.
- 3 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам веществ / Н.Б. Варгафтик. М.: Наука,

1972. 720 с.

4 Акулов А.А. Теплофизические свойства криопродуктов / А.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов. СПб.: Изд-во Политехника, 2001. 242 с.

5 Алтунин В.В. Теплофизические свойства фреонов. Т. 1. Фреоны метанового ряда (фреоны 20, 21, 22, 23). / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.К. Петров и др. М.: Изд-во стандартов, 1985. 264 с.

6 Богданов С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник: 4-е изд., перераб. и доп. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов и др.; Под ред. С.Б. Богданова. СПб.: СПб ГАХИТ, 1999. 310 с.

7 Yonglove B.A. Thermo physical Proprieties of Methane, Propane. Butane. And iso-Butane. J. Phis. Chem. Ref. / B.A. Yonglove, J.F. Rey. Data. 1987. Vol. 16, N 4. P. 584 – 592.

8 Нисельсон Л.А. Ортобарические плотности и критические параметры ряда высших элементов III и IV групп периодической системы / Л.А. Нисельсон, Т.Д. Соколова, Р.К. Николаев. М.: Изд-во Стандартов, 1970. С. 246 – 255.

9 Рабинович В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона, ксенона / В.А. Рабинович, Л.С. Векслер. М.: Изд-во стандартов, 1970. С. 83 – 94.

10 Ма Ш. Современная теория критических явлений / Ш. Ма. М.: Мир, 1980. С. 25.

11 Филиппов Л.П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ / Л.П. Филиппов. М.: Изд-во МГУ. 1988. С.13 – 28.

***В.В. Ветров, С.И. Стреляев***

Тульский государственный университет

## **ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫЕ КРАСКИ КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

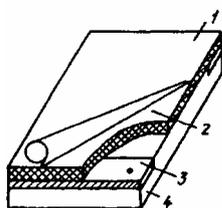
В настоящее время в области создания электротепловых нагревательных устройств преобладают различные конструктивные модификации спиральных и трубчатых электронагревателей, для которых характерна неразвитость нагреваемой поверхности, компенсируемая высокой температурой нагреваемого элемента. Это приводит к высоким уровням ИК излучения и значительному поглощению кислорода воздуха. Кроме того, указанные нагреватели обладают значительной тепловой инерционностью, что снижает их энергетическую эффективность. Спиральные и трубчатые нагреватели создают существенные трудности при компоновке и значительно усложняют конструкцию электронагревательных устройств. Указанные недостатки снижают экономические и эксплуатационные характеристики нагревательных устройств, Существенными достоинствами по сравнению с трубчатыми и спиральными нагревателями обладают разрабатываемые в России и за рубежом нагреватели на основе резистивных материалов, включающих в себя как токопроводящие, так и электроизолирующие элементы, причем последние часто выполняют роль конструктивных. Токопроводящие элементы могут быть представлены частицами, волокнами или пленками, создающими соответственно дисперсные, волокнистые или слоистые композиции.

Материалы, выполненные на основе указанных композиций, должны обладать заданным комплексом физико-механических и электрофизических свойств, позволяющих обеспечить необходимые характеристики нагревательных устройств и их надежность. С этой точки зрения волокнистые резистивные материалы отличаются высокой стабильностью электрических свойств, но в то же время недостаточными механической прочностью и технологической стабильностью, значительными объемными деформациями в процессе эксплуатации, а также недостаточной равномерностью нагрева поверхностей. В связи с этим использование данных материалов в электронагревателях с высокими эксплуатационными характеристиками весьма ограничено. Поисковые и патентные исследования показали, что к настоящему времени в отечественной практике не известны электропроводные покрытия, в полной мере отвечающие всему комплексу требований, предъявляемых к нагревательным устройствам различного назначения.

При выполнении ряда научно-исследовательских работ по созданию тепловых имитаторов с поверхностным тепловыделением по заказу Миноборонпрома, начиная с 1987 г., исследовались различные токопроводящие эмали на основе дисперсных композиций. Наилучшими из существующих харак-

теристик обладает эмаль АК-5260, разработанная ГИПИ ЛКП (Москва), однако и она несовершенна: недостаточная термостойкость ( $T_{\max} \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ), большое значение температурного коэффициента сопротивления ( $\text{TKC} \approx 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), изменение электрического сопротивления из-за высокой гигроскопичности материала покрытия при воздействии влаги, недостаточная механическая прочность и т.д. Необходимо отметить, что покрытие на основе данной эмали ранее не рассматривалось как основа для электронагревательных элементов. Поверхностные электронагреватели (ПЭНы), разработанные авторами (а.с. 1811036, СССР), представляют собой диэлектрическую подложку с нанесенной на нее одно- или двух-сторонней высокоомной пленкой из термостойкой электропроводной эмали, с которой контактируют медные токопроводящие шины (рис. 1).

Многочисленные вариации рецептуры и эксперименты с нагревательными элементами на их основе позволили предложить новую модификацию эмали, где в качестве пленкообразующего материала используется сополимер метакриламида, бутилметакрилата и акрилонитрила – АСН



**Рис. 1 Поверхностный электронагревательный элемент на основе электропроводной эмали с диэлектрической подложкой:**

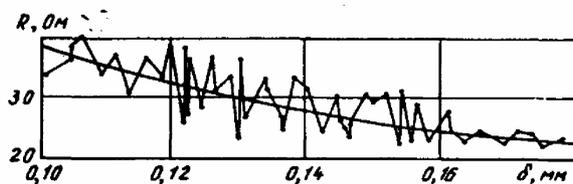
1 – изоляция; 2 – эмаль; 3 – шина;  
4 – подложка

(Одобрено 10.12.75) является порошкообразное карбонильное железо и коллоидный графит (патент РФ 2065467 от 20.08.96).

Электрические характеристики токопроводящих покрытий на основе электропроводной эмали в значительной степени определяются физическими явлениями на границе раздела как между компонентами, так и между конструктивными элементами электрической цепи. Методом металлографического анализа визуализирована структура покрытия и подтверждена гипотеза о статистически-матричном характере распределения компонентов наполнителя в связующем.

Статистическое распределение частиц коллоидного графита в акриламидном полимере образует кусочно-непрерывные в плоскости и замкнутые в трехмерном пространстве цепочки проводимости. Распределение несоприкасающихся друг с другом частиц карбонильного железа или их микрогрупп (по 2-3 шт.) в указанной статистической композиции имеет матричный характер и существенно не влияет на удельное сопротивление и ТКС композиции покрытия, однако стабилизирует эти параметры за счет улучшения объемной структуры, перезамыкая часть цепочек проводимости.

Установлено, что основная электрическая характеристика покрытия – электрическое сопротивление покрытия на квадрат площади,  $R_{\square}$ , определяемая рецептурой и дисперсным составом эмали, толщиной покрытия и режимом термообработки, имеет значительный разброс аналогично разбросу электрических сопротивлений ПЭНов ( $R$ ) в опытных партиях (рис. 2).



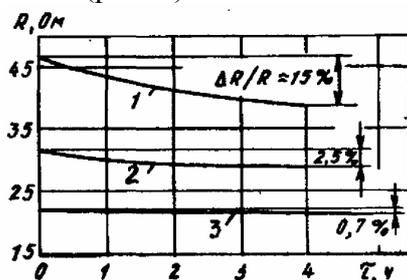
**Рис. 2 Разбросы электрических сопротивлений в партии ПЭНов по толщине покрытия**

Это объясняется случайным характером мгновенного распределения компонентов эмали в момент формирования пленки покрытия, разбросом толщины слоев покрытия при ручном пневмораспылении, качеством композиционной смеси и неравномерностью температуры в объеме сушильной камеры.

Статистический закон распределения  $R$  в технологической партии однотипных нагревательных

элементов стремится к нормальному с увеличением числа элементов ( $\Delta R_{\max} = 3\sigma = 30\% R_{\text{ср}}$ ). Доказано, что толщина покрытия влияет на стабильность  $R_{\square}$  и рационально ее варьировать в диапазоне  $\delta = 0,1 \dots 0,2$  мм.

Температурный режим сушки покрытия  $T_c > 160$  °С, так как именно при этой температуре в первом цикле нагрева обнаруживается максимум функции  $R = f(T)$ , что дает основание предполагать начало «сшивки» полимера при этой температуре. Окончательное значение электрического сопротивления зависит от температуры  $T_c$  и времени сушки  $\tau_c$ . Стабильные значения  $R_{\square}$  в рабочем диапазоне температур достигаются при  $T_c = 200 \pm 5$  °С и  $\tau_c > 10$  ч (рис. 3).



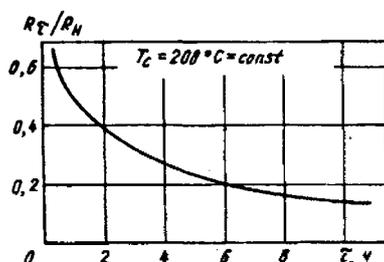
**Рис. 3** Стабильность электрического сопротивления ПЭНа при различных режимах сушки эмали:  
 1 –  $T_c = 150$  °С;  $\tau_c = 2$  ч; 2 –  $T_c = 200$  °С;  $\tau_c = 2$  ч;  
 3 –  $T_c = 200$  °С;  $\tau_c = 9$  ч

На основе исследования опытной партии унифицированных нагревательных элементов предложен способ изготовления ПЭНов с заданным электросопротивлением (а. с. 324429, СССР).

Время сушки (термообработки) покрытия в данном способе регламентируется зависимостью

$$\tau_c = a - b \ln \left( \frac{R_H}{R_K} - c \right),$$

где  $\tau_c$  – необходимое время термообработки электропроводного покрытия с целью получения заданного (конечного) электрического сопротивления  $R_K$  по известному начальному  $R_H$ .



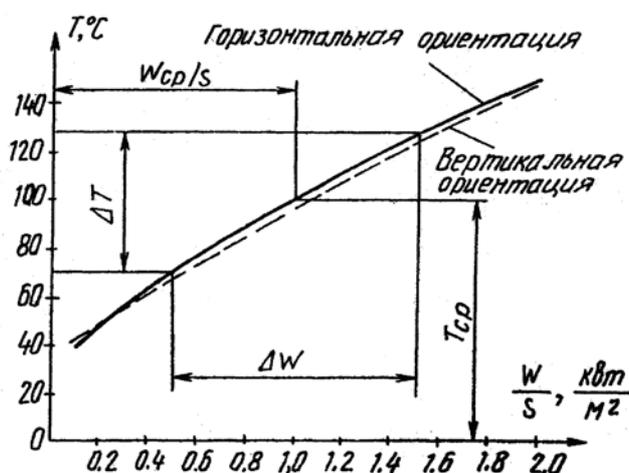
**Рис. 4** Зависимость относительного изменения электрического сопротивления ПЭНа от времени сушки

Постоянные коэффициенты для эмали АК-5260М определены экспериментально:  $a = -1,68$ ;  $b = 2,5$ ;  $c = 0,148$  (рис. 4).

Проведенные исследования доказали принципиальную возможность создания ПЭНов на основе электропроводной эмали АК-5260М, которые обладают следующими эксплуатационными характеристиками:

Напряжение, В .....	12 ... 380
Род тока .....	любой
Максимальная удельная мощность (в зависимости от условий теплообмена), кВт/м <sup>2</sup> .....	до 100
Максимальная рабочая температура, °С .....	160
Электрическое сопротивление квадрата $R_{\square}$ , Ом .....	30 ... 60
Время безотказной работы, не менее, ч .....	20 000

По сравнению с аналогами ПЭНы имеют ряд существенных преимуществ: относительно низкую температуру нагревательного элемента; малые теплоемкость и теплоинерционность; удобство компоновки в устройствах при минимальных объемах; равномерность нагрева поверхности; возможность использования в качестве подложки пластмасс, керамики, металлов; отсутствие пусковых токов.



**Рис. 5** Температура рабочей поверхности ПЭНа в зависимости от удельной электрической мощности

Следует выделить области рационального применения, где преимущества поверхностного нагрева могут быть реализованы в полной мере:

- нагревание и термостатирование объемов (настенные, напольные и подпольные обогреватели воздуха в жилых, растение- и животноводческих помещениях; инкубаторы, сушильные шкафы и емкости для термостатированного хранения сельхозпродукции);
- нагревание поверхностей (электроутюги, термопрессы, электроглянцеватели, мармиты, технологические столы);
- нагревание объемов жидкости (электропосуда, термостаты, фотокюветы, аквариумы, подогреватели масла в картере двигателя);
- нагревание массопотоков (проточные водонагреватели, сушка зерна, опилок и т.д.).

Проведенные исследования подтверждают принципиальную возможность создания электронагревательных приборов различного назначения нового технического уровня посредством использования сплошных токопроводящих покрытий.

При этом ПЭНы на основе эмали АК-5260М обладают удовлетворительной стабильностью характеристик при условии высокой технологической дисциплины изготовления.

*Г.Н. Дульнев*

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

### 1 Синергетика – новая наука

Синергетика – новая наука, едва насчитывающая четверть века, но она уже овладевает умами значительной части ученых в различных областях знания. Можно отметить три основные особенности синергетики: открытость, когерентность, нелинейность. Это значит, что рассматриваются открытые системы, которые обмениваются с окружающей средой материей, энергией и информацией. Далее отдельные части системы взаимодействуют согласованно, что приводит к резонансным явлениям, или возникает когерентность процесса. И, наконец, явления описываются нелинейными уравнениями, т.е. имеют несколько решений. Сам термин «синергетика» имеет несколько синонимов: коллективный, или совместный процесс, соработничество, самоорганизация и другие. Можно сказать, что если в обычных системах происходит взаимодействие, то в синергетических системах между элементами возникает взаимо-

содействие, или в таких системах возможны эффекты согласования, когда элементы устанавливают связь друг с другом. Такое кооперативное согласованное поведение можно встретить в системах, образованных из молекул, клеток, нейронов, социальных групп и так далее. Это поразительное явление приводит к образованию высокоупорядоченных структур из зародышей, находящихся в хаотическом состоянии. Синергетика носит интегрирующий характер, объединяя общими законами разные области наук – физику, химию, биологию, психологию, социальные науки.

Синергетические подходы достаточно широко использовались при анализе задач теплопроводности и позволили выявить ряд необычных закономерностей и по новому взглянуть на эту хорошо изученную и довольно старую область прикладной физики. В настоящей статье это положение будет проиллюстрировано на примере нескольких классических задач теплопроводности [1].

## 2 Задача Коши

Рассматривается неограниченная область, процессы в которой определяются начальными условиями. В неограниченном пространстве в одномерном варианте математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{а) } \frac{\partial t}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad -\infty < x < \infty; \\ \text{б) } \frac{\partial t(-\infty, \tau)}{\partial x} &= \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0; \\ \text{в) } t(x, 0) &= t_0(x). \end{aligned} \quad (1)$$

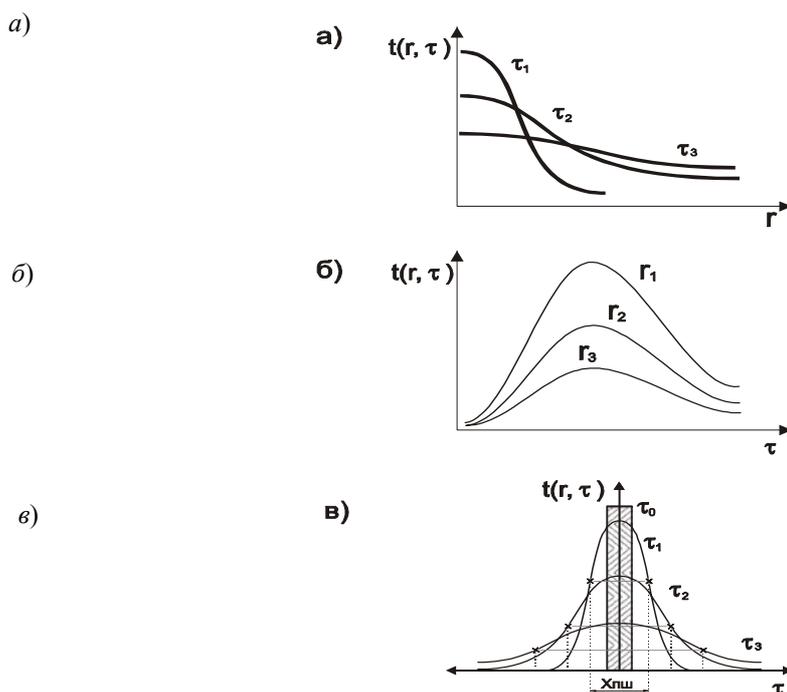
Как следует из (1, в), в начальный момент времени нагрет маленький участок, а остальное пространство холодное. Главное (фундаментальное) решение системы (1) имеет вид [1, 4]:

$$t(x, a) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a\tau}} \int_{-\infty}^{\infty} t_0(x') e^{-\frac{(x-x')^2}{4a\tau}} dx', \quad (2)$$

где  $x'$  – координата области с температурой  $t_0(x')$ .

На рис. 1 представлены свойства этого решения:

- максимум температуры  $t(0, \tau)$  изменяется пропорционально  $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ ;
- температура в любой точке  $x \neq 0$  сначала растет, а затем падает и при  $t(x, \tau)|_{\tau \rightarrow \infty} = 0$ ;
- влияние источника при  $\tau > 0$  ощущается в любой точке пространства, т.е. скорость распространения тепла бесконечна;
- полуширина нагретой области хпш (размер профиля температуры на уровне  $0,5t(0, \tau)$ ) растет пропорционально  $x_{\text{пш}} \sim \sqrt{a\tau}$ .



**Рис. 1 Температурные поля в неограниченной среде с мгновенным источником тепла:**

- $a - t$  как функция  $r$  в различные моменты времени  $\tau$ ;
- $b - t$  как функция времени  $\tau$  для различных точек пространства;
- $\epsilon$  – полуширина нагретой области

**3 Нелинейная задача Коши**

Предположим, что теплофизические свойства среды нелинейны, т.е.  $a = a_0 t^\sigma$ , тогда уравнение теплопроводности примет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a_0 t^\sigma \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad a = a_0 t^\sigma. \quad (3)$$

Пусть в такой нелинейной среде в начальный момент времени в точке мгновенно выделяется некоторое количество тепла. Процесс его распространения будет в корне отличаться от предыдущего случая. В 1966 г. Зельдович и Рейзер нашли аналитическое решение этого уравнения в следующей форме [2, 3]:

$$t(x, \tau) = \begin{cases} t_m(\tau) \left[ 1 - \left( \frac{x}{x_\phi(\tau)} \right)^2 \right]^{1/\sigma}, & |x| \leq x_\phi(\tau), \\ 0, & |x| > x_\phi(\tau), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_\phi$  – координата фронта  $t(x_\phi, \tau) = 0$ ,  $t(x, \tau) > 0$  при  $x < x_\phi$ ;  $t_m$  – максимальное значение температуры.

Принципиальное отличие решений (2) и (4) состоит в следующем:

- область с ненулевой температурой отделена от холодного вещества четким фронтом  $x_\phi$ ;
- фронт перемещается по веществу с конечной скоростью;
- координата фронта  $x_\phi(\tau) \sim \frac{1}{\tau^{\sigma+2}}$ , а холодная и нагретая области имеют границы  $t[x_\phi(\tau), \tau] = 0$ ,  $t(x,$

$\tau) > 0$  при  $x_\phi > x$ .

Итак, в нелинейной задаче Коши имеет место локализация тепла.

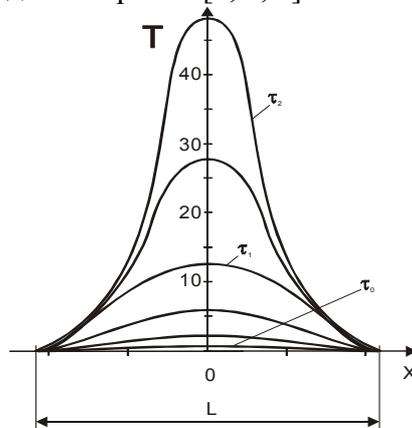
**4 Задачи с горением**

Рассмотрим нелинейную среду  $a = a_0 t^\sigma$  с нелинейным источником  $Q = q_0 t^\beta$ ; уравнение теплопроводности для такой среды примет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_0 t^\sigma \frac{\partial t}{\partial x} \right) + q_0 t^\beta. \quad (5)$$

Такие задачи характерны при анализе процессов в плазме, химической кинетике и экологии.

Нелинейный источник обладает следующим свойством: чем более отклонение от равновесия, тем быстрее идет процесс (источник съезжает с горы, которая становится все круче). Графическое представление решения этого уравнения приведено на рис. 2 [1, 3, 4].



**Рис. 2 Решение уравнения теплопроводности (5) для нелинейной среды  $s = 2$ ,  $\beta = 3,5$  при  $a_0 = q_0 =$**

Обратим внимание на следующие особенности решения:

- профили температуры оказываются локализованы внутри области  $L$ , вне которой  $t(x, \tau) = 0$ ;
- из среды выделяются ограниченные участки, в пределах которых происходит горение.

Заметим, что решение задачи (5) существует в течение ограниченного времени (время обострения), за которое функция  $t(x, \tau)$  в одной или нескольких точках обращается в бесконечность, то есть ведущими оказываются один или несколько быстрых процессов, а остальные как бы замирают. Пусть независимо развиваются несколько локализованных структур, области локализации которых пересекаются. Тогда структуры начинают взаимодействовать, возникает волна горения сложной формы и, в конце концов, остается одна быстро горящая структура. Из теории эволюции известно, что существует естественный отбор признаков, дающих преимущество в ходе развития, т.е. в естественном отборе побеждают более совершенные формы. Так возникает пространственно-временная упорядоченность в первоначально неорганизованной среде.

## 5 Ячейки Бенара

В синергетике рассмотрены и другие задачи теплопроводности. К ним относится анализ процессов, проходящих при переносе тепла от нагретой к холодной пластине, благодаря молекулярной передаче энергии хаотически движущихся молекул. В 1901 г. физик Бенар обнаружил, что при определенных значениях температур пластин и расстоянии между ними (а точнее при определенных значениях Прандтля и Грасгофа) хаотически движущиеся молекулы приобретают строго организованный характер – возникают конвективные кольца. Хаотическое движение становится упорядоченным. Этот процесс в семидесятых годах XX века описал американский метеоролог Лоренц и получил систему связанных между собой нелинейных уравнений, носящих его имя.

Эти уравнения описывают турбулентную конвекцию в горизонтальной щели и обычны для земной атмосферы. Они приводят к тому, что при определенных условиях решения теряют устойчивость и временная эволюция обладает всеми признаками хаотического поведения (странный аттрактор) или, иными словами, дают объяснение плохой предсказуемости погоды.

Итак, в задачах теплопроводности для термодинамических открытых систем, описываемых нелинейными уравнениями, в определенных условиях явно проявляется самоорганизованность процесса, что говорит о когерентном его поведении [1, 4].

## Список литературы

- 1 Дульнев Г.Н. Введение в синергетику / Г.Н. Дульнев. СПб.: Проспект, 1998. 257 с.
- 2 Компьютерные и нелинейные явления, информатика и современное образование. М.: Наука, 1988. 191 с.
- 3 Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент, введение в информатику с позиции математического моделирования. М.: Наука, 1988. 170 с.
- 4 Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. М.: Наука, 1990. 270 с.

*А.А. Лунаев*

Альметьевский государственный нефтяной институт

## ТЕПЛОФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Теплофизику горных пород можно определить как науку о тепловых процессах, происходящих в недрах, о тепловых характеристиках горных пород и методах их исследования.

Тепловые свойства горных пород – теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость оказывают существенное влияние на естественные и искусственные поля температуры в недрах, изучение которых способствует решению задач поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа на современном этапе в условиях ухудшения структуры запасов углеводородов и обострения экологических проблем. Так, существует четкая связь между размещением залежей нефти и газа и распределением геотемпературных полей, что обуславливает эффективность геотермических исследований при

поиске и разведке месторождений углеводородов. Для таких исследований необходима информация о теплопроводности горных пород.

Использование достоверных данных о тепловых свойствах пород существенно повышает эффективность термометрии при контроле за эксплуатацией нефтяных месторождений (оценка перетоков флюидов в скважинах, исследования на больших глубинах в простаивающих после бурения скважинах и др.).

С привлечением информации о тепловых характеристиках горных пород решаются задачи прогнозирования глубинных температур, изучения литологических особенностей разрезов скважин, контроля за эксплуатацией газовых хранилищ, поиска и разведки подземных вод, изучения направлений их миграции, оценки области теплового влияния скважин и т.д. Для этого требуется знать зависимости тепловых параметров пород от горного и пластового давления, температуры, характера насыщения, фильтрации флюидов.

Особо актуально исследование тепломассопереноса в коллекторах для рационального проектирования тепловых методов повышения нефтеотдачи пластов высоковязких или парафинистых нефтей, а также извлечения природных битумов. Воздействие на пласты теплом, как известно, может производиться прогревом призабойной зоны скважин паром и различными нагревателями, нагнетанием в пласт теплоносителей (нагретых воды или газа, пара), иницированием внутрипластового горения, а также влажного горения (с вводом в пласт воды для образования теплоносителя) и другими способами. Отличительными чертами теплового воздействия являются большие потери тепла в окружающем массиве пород и отставание теплового фронта от гидродинамического.

Эффективность теплового воздействия, как известно, определяется коэффициентом полезного использования тепла, т.е. отношением количества тепла, сохранившегося в пласте к общему количеству тепла, введенного в пласт или генерируемого в нем за определенный промежуток времени. С увеличением области прогрева пласта возрастают тепловые потери в окружающие породы, и при заданном расходе теплоносителя на определенном расстоянии от нагнетательной скважины скорость продвижения теплового фронта будет уменьшаться и может наступить динамическое равновесие между вводом и потерями тепла. Тепловая эффективность, таким образом, определяется темпом ввода количества тепла и прогреваемостью пласта, которая зависит от тепловых свойств горных пород. Таким образом, системы разработки месторождений высоковязких нефтей и битумов с тепловым воздействием должны проектироваться, в том числе с учетом тепловых свойств пород, насыщающих их жидкостей, а также величин геотермических параметров.

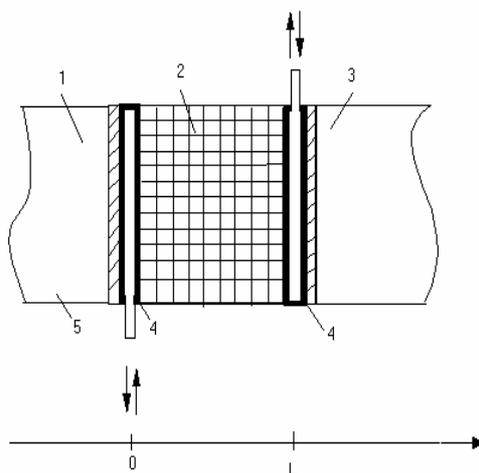
Между тем, исследования, проведенные Б.А. Яковлевым и др., показывают, что даже для литологически однородных или одновозрастных толщ пород тепловые свойства не являются константами, они зависят не только от минералого-петрографического состава скелета, но и от характера насыщения, пористости, размеров и формы зерен и пор и других факторов строения. Кроме того, эти тепловые характеристики являются сложными функциями термодинамических условий массива-температуры, горного и пластового давлений, фильтрации флюидов и т.д.

Существенный вклад в исследование процессов тепломассопереноса в горных породах, разработку теоретических и экспериментальных методов определения тепловых свойств гетерогенных сред внесли Х.И. Амирханов, П.В. Бриджмен, С.П. Власова, В.С. Волькенштейн, В.К. Гордиенко, В.Н. Дахнов, Г.Н. Дульнев, А.Д. Дучков, Д.И. Дьяконов, В.Е. Зиновьев, Д. Егер, Г. Карслоу, Г.М. Кондратьев, Р.И. Кутас, Е.А. Любимова, А.В. Лыков, Г.Е. Малофеев, У.И. Моисеенко, С.А. Николаев, Г.Н. Петрунин, Е.С. Платунов, Ю.А. Попов, Г.М. Сухарев, В.В. Суетнов, Ю.К. Тарануха, Л.П. Филиппов, А.Ф. Чудновский, Э.Б. Эмиров, Р.П. Юрчак, Б.А. Яковлев и многие другие ученые.

Тем не менее, следует отметить недостаточную (в основном на качественном уровне) изученность влияния термодинамических параметров пласта, в том числе фильтрации флюидов на теплоперенос в горных породах. Для оптимизации технологий теплового воздействия на пласты высоковязких нефтей и битумов и контроля за извлечением углеводородов требуется исследование динамики изменения в этих процессах тепловых характеристик коллекторов, покрышек и пластовых флюидов, изучение взаимосвязей тепловых, коллекторских и других физических свойств пород и построение на базе анализа геотермических условий недр и результатов ГИС геотепловых моделей месторождений. В связи с этим особое значение приобретает проблема разработки методов и экспрессной экспериментальной аппаратуры, пригодной для измерений комплекса параметров тепломассопереноса в горных породах в широком диапазоне изменения давлений, температуры, при наличии фазовых переходов и т.д.

Автором на основе обобщенной схемы регулярного теплового режима третьего рода в системе контактирующих тел предложены оригинальные лабораторные методы и установки для исследования тепловых свойств пород-коллекторов при моделировании термодинамических условий пласта, фильтрации флюидов, взрывного или импульсного воздействия на образец.

Согласно этой схеме исследуемый образец 2 в форме пластины толщиной  $L$  помещается между двумя полуограниченными эталонными телами 1 и 3, имеющими известные, но в общем случае, различные тепловые характеристики. Плоский источник периодического нагрева 5 размещается на границе сопряжения образца 2 с эталонным телом 1. Для создания фильтрационного потока через исследуемый образец 2 в зону контактов его с телами 1 и 3 вводятся плоские камеры 4, обладающие малым термическим сопротивлением. В процессе теплопередачи учитывается их тепловое сопротивление и теплоемкость, а также распределение температуры по толщине камер.



**Рис. Принципиальная схема метода определения тепловых свойств коллекторов в условиях фильтрации**

Частные случаи отмеченной тепловой схемы приводят к методикам, описанным в работах С.А. Николаева, Л.П. Филиппова и других ученых.

Результаты теплофизических исследований горных пород нефтяных месторождений опубликованы в [2].

Полученные данные показывают, что шешминский горизонт Мордово-Кармальского месторождения битумов, представленный песчаными породами, является существенно неоднородным по теплопроводности, что должно быть учтено при геотермических исследованиях, обосновании и проектировании систем разработки с тепловым воздействием, в том числе при рациональном размещении сетки добывающих и нагнетательных скважин, выборе объектов разработки, определении участков максимальных потерь тепла через кровлю и подошву пласта и решении других задач.

Анализ закономерностей температурных полей, возникающих в пористой среде при ее периодическом нагреве и фильтрации через нее жидкостей показывает примеры использования этих закономерностей в нефтепромысловой геофизике и решении других задач нефтегазового дела.

Организация геотермического контроля за разработкой нефтяных месторождений при заводнении поверхностными водами, а также за техническим состоянием скважин позволяет прогнозировать количество предстоящих ремонтов скважин и необходимость ремонтных бригад.

Как подтверждают результаты экспериментальных исследований при термоциклическом и термохимическом воздействии на продуктивные пласты происходит растрескивание пород и повышение их проницаемости, что, в конечном счете, приводит к увеличению коэффициента нефтеизвлечения.

Теоретические расчеты прогрева призабойной зоны нефтяных скважин с учетом изменения коэффициентов тепло- и температуропроводности горных пород при повышении температуры показывают, что при одном и том же времени нагревания с учетом наблюдаемого уменьшения тепло- и температуропроводности горных пород достигается более высокая температура в призабойной зоне скважины, чем в случае, когда их тепловые характеристики принимаются постоянными. Это позволит сократить планируемое время нагревания до определенной требуемой температуры и уменьшить затраты энергии.

Решена задача прогрева призабойной зоны скважины с учетом конвекции заполняющего ствол скважины флюида, а также организации термоциклического воздействия на призабойную зону пласта с отбором и продукцией, что позволяет более достоверно рассчитывать температурное поле окружающего массива пород и оптимизировать параметры процесса.

Таким образом, из приведенных примеров видно, что теплофизические исследования горных пород востребованы в нефтепромысловой практике.

### Список литературы

1 Липаев А.А. Теплофизика горных пород нефтяных месторождений / А.А. Липаев, Р.С. Хисамов, В.А. Чугунов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 304 с.: ил.

2 Липаев А.А. Тепловые свойства горных пород нефтяных месторождений Татарстана: Справочник / А.А. Липаев, В.М. Гуревич, С.А. Липаев. Казань: Изд-во Казан. матем. об-ва, 2001. 205 с.

*Ю.Я. Печенегов, О.Ю Косова*

Технологический институт Саратовского государственного  
технического университета

### СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С РАЗМЕЩЕНИЕМ ДАТЧИКА СНАРУЖИ ТРУБЫ

Для оперативных измерений расхода теплоносителя, в частности при проведении энергетических обследований, рекомендуется способ, предложенный в [1].

Способ основан на измерении плотности теплового потока через стенку трубы с помощью накладываемого на поверхность стенки пояса- тепломера из гибкого малотеплопроводного материала, снабженного дифференциальной термопарой и термопарами для измерения температуры поверхности трубы. По измеренной плотности теплового потока находится расход теплоносителя с использованием известных зависимостей, описывающих локальный теплообмен теплоносителя в трубе.

Часто на практике требуется знать расход сухого насыщенного пара, который широко используется в промышленных технологиях в качестве греющего теплоносителя, В этом случае по известному давлению в трубе находится по таблицам насыщенного пара температура насыщения  $t_s$ , которая принимается равной среднemasсовой температуре теплоносителя  $t_n$ . С помощью термопар на поясе - тепломере измеряется температура наружной поверхности стенки трубы  $t_{cr}$ . По показаниям дифференциальной термопары, с использованием предварительно полученной градуировочной характеристики пояса-тепломера, определяется плотность теплового потока  $q$  от теплоносителя через стенку трубы в окружающую среду.

Очевидно, что коэффициент теплообмена потока теплоносителя при этом

$$\alpha = \left[ t_n - t_{cr} - \left( \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cr}} \right) q \right]. \quad (1)$$

С другой стороны, например при турбулентном режиме течения, коэффициент теплообмена определяется известным уравнением

$$\alpha = 0,022 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{4G}{\pi d \mu} \right)^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (2)$$

Из совместного рассмотрения формул (1) и (2) получаем выражение для расхода теплоносителя  $G$ , которое для насыщенного водяного пара, с учетом зависимостей его теплофизических свойств от  $t_s$ , представлено в виде

$$G = (0,146 - 0,000314t_s)d \left[ \frac{qd}{t_s - t_{cr} - \left( \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cr}} \right) q} \right]^{1,25}, \text{ кг/с.} \quad (3)$$

Выполненные оценки показывают, что максимальная погрешность определения расхода по предлагаемому методу составляет 7 %.

По сравнению с известными ультразвуковым и термоконвективным способами, не требующими размещения датчика в трубопроводе, предлагаемый способ измерения расхода имеет следующие преимущества: простота аппаратного оформления; ограниченное число и однородность измеряемых первичных параметров и повышенная, в связи с этим, надежность измерений; универсальность и возможность использования в широком интервале изменения температур и физических свойств теплоносителей; практическая независимость точности измерений от влияния внешних тепловых воздействий; отсутствие потребления энергии извне.

### Список литературы

1 Пат. 2082106 РФ. Способ измерения расхода теплоносителя / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Печенегова // Б.Н. 1997. № 17.

## Доклады

*К.З. Альжанов, А. Махумдолда*

**КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Е.А. БУКЕТОВА (КАЗАХСТАН)**

### **КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРА МАСС**

Стационарно-проточным методом измерены коэффициенты диффузии бинарных смесей в системе центра масс в широком интервале температур. Приведено описание методики реализации систем отчета в диффузионной ячейке. Измеренные значения коэффициентов диффузии сопоставлены со строгой кинетической теорией. Экспериментально установлено, что зависимость коэффициентов диффузии от температуры описываются степенным законом, методом наименьших квадратов определены значения константы. Коэффициенты диффузии в системе центра масс обратно пропорциональны молярной массе компонентов.

Стационарно-проточный метод, позволяющий совместить с прибором практически любую систему отчета, основан на интерпретации коэффициента взаимной диффузии газов, как характеристика суммарного массопереноса – молекулярного и гидродинамического. Общий перенос каждого компонента запишется в виде I закона Фика с конвективным членом:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1^V &= D_1 S \nabla C_1 + C_1 S \bar{V}; \\ \bar{I}_2^V &= D_2 S \nabla C_2 + C_2 S \bar{V}, \end{aligned}$$

где  $D_1, D_2$  – истинные коэффициенты диффузии (ИКД);  $\nabla C_1, \nabla C_2$  – градиенты концентрации диффундирующих газов;  $S$  – сечение капилляра;  $\bar{V}$  – скорость гидродинамического потока смеси.

В достаточно длинном узком капилляре распределение концентрации имеет линейный вид, диффузионные потоки можно записать в виде

$$\bar{I}_1^V = D_{12}S \frac{\Delta C_1}{L}; \quad \bar{I}_2^V = D_{12}S \frac{\Delta C_2}{L},$$

где  $L$  – длина капилляра;  $\Delta C_1, \Delta C_2$  – разность относительной концентрации первого и второго газа на концах капилляра;  $D_{12}$  – коэффициент взаимной диффузии (КВД).

В теоретических исследованиях применяется система отсчета, связанная с центром масс. Однако коэффициенты диффузии бинарных смесей в данной системе отсчета не исследовались. Как показано в работах [1, 2], концентрация первого газа  $C_1^0$  и второго  $C_2^L$  на выходе из щелевого трубопровода определяются:

$$C_1^0 = \frac{\bar{I}_1}{V + (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)}; \quad C_2^L = \frac{\bar{I}_2}{V - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)}.$$

При реализации системы центра масс в диффузионной ячейке потоки масс компонентов будут равны. Из равенства потоков найдем условия осуществления системы центра масс в диффузионной ячейке [3]:

$$\frac{C_1^0 (1 - 2 C_2^L)}{C_2^L (1 - 2 C_1^0)} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = K.$$

Расчетные формулы для коэффициентов диффузии в системе центра масс имеют вид:

$$\bar{D}_1^m = \frac{2I_1^m L}{S[2 - (C_1^0 + C_2^L)]\rho_1}; \quad \bar{D}_2^m = \frac{2I_2^m L}{S[2 - (C_1^0 + C_2^L)]\rho_2}.$$

Коэффициенты диффузии в системе центра масс связаны с коэффициентами взаимной диффузии локальными выражениями [4]:

$$D_1^m = \frac{m_2 D_{12}}{m_1 c_1 + m_2 c_2}; \quad D_2^m = \frac{m_1 D_{12}}{m_1 c_1 + m_2 c_2}. \quad (1)$$

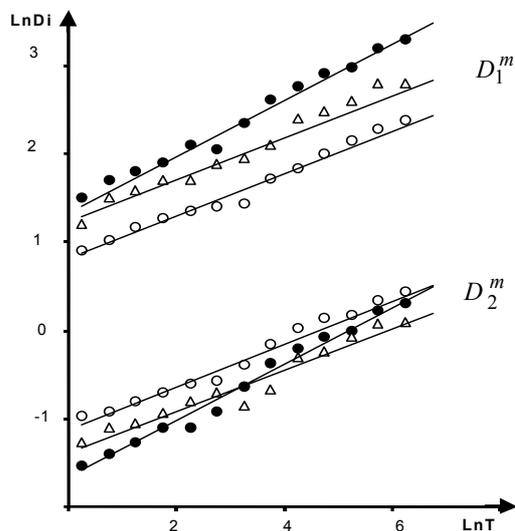
На опыте измеряется усредненное по концентрации значение коэффициента диффузии. Поэтому для сравнения измеренных коэффициентов в системе центра масс с вычисленными необходимо получить соответствующую интегральную формулу

$$\bar{D}_1^m = \frac{1}{C_1^L - C_1^0} \int_{C_1^0}^{C_1^L} D_1(C_1) dC_1 = \frac{m_2 D_{12}}{(C_1^L - C_1^0)(m_1 - m_2)} \ln \frac{(m_1 - m_2)C_1^L + m_2}{(m_1 - m_2)C_1^0 + m_2}.$$

Для второго компонента получается аналогично:

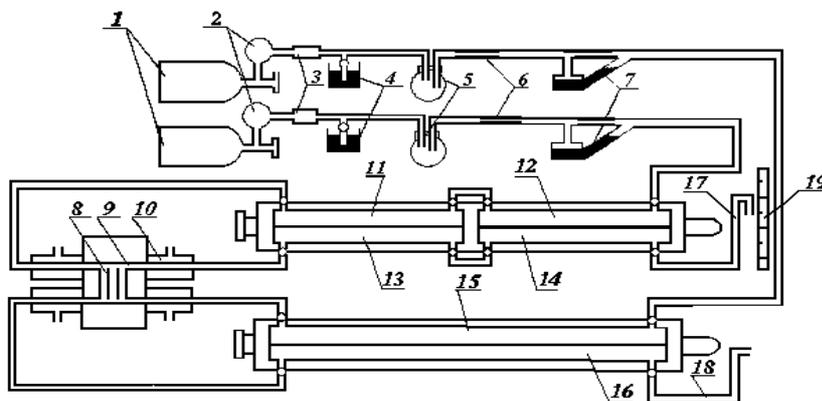
$$\bar{D}_2^m = \frac{1}{C_2^L - C_2^0} \int_{C_2^0}^{C_2^L} D_2(C_2) dC_2 = \frac{m_1 D_{12}}{(C_2^L - C_2^0)(m_2 - m_1)} \ln \frac{(m_2 - m_1)C_2^L + m_1}{(m_2 - m_1)C_2^0 + m_1}.$$

Для установления связи определяемой формулами (1) измерены коэффициенты диффузии бинарных смесей  $H_2-He$ ,  $H_2-N_2$ ,  $He-CO_2$  в системе среднечисловой скорости, и  $H_2-Ar$ ,  $He-N_2$ ,  $H_2-N_2$  в системе центра масс в широком интервале температур, и приведены на рис. 1.



**Рис. 1 Температурная зависимость коэффициентов диффузии в системе центра масс:**  
 линия – теория, точки – эксперимент ● –  $H_2-Ar$ , ○ –  $He-N_2$ , Δ –  $H_2-N_2$

Анализ эксперимента показал, что для всех исследованных пар газов отношения коэффициентов диффузии в системе центра масс, в пределах ошибки эксперимента, обратно пропорционально молярным массам диффундирующих газов. При определении интегральных значений коэффициентов  $\bar{D}_1^m$ ,  $\bar{D}_2^m$  не учитывалась концентрационная зависимость коэффициента взаимной диффузии. Как видно из графиков, экспериментальные значения коэффициентов диффузии в системе центра масс удовлетворительно соответствуют теории диффузии Л. Больцмана. Измерения коэффициентов диффузии осуществлялись на экспериментальной установке [2, 3], основанной на стационарно-проточном методе (рис. 2). Ее условно можно разделить на четыре части: узел для получения измерения не пульсирующих потоков исследуемых газов; диффузионная ячейка, в которой осуществляется реализация определенной системы отсчета; анализирующее устройство с приспособлением для измерения гидростатического давления в щелевых трубопроводах и электросхемы печи. Исследуемые газы из баллонов высокого давления 1 через редукторы 2 и осушители 3 подаются в маностаты 4, которые служат как регуляторы давления. Маностаты заполнены дибутилфталатом. Избыточное давление отводится посредством бокового отростка. Для промывки газовых магистралей исследуемыми газами трубки маностатов, опускаемые в жидкость, снабжены кранами, которые закрываются при откачке и открываются в рабочем положении. Для сглаживания пульсаций газы из маностатов поступают в соответствующие буферные баллоны 5 и сглаживающие капилляры 6. В качестве буферных баллонов применялись колбы емкостью  $(8 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Объемная скорость исследуемых газов измерялась наклонными реометрами 7. Реометры наполнены дибутилфталатом и для исключения температурного влияния окружающей среды помещены в термостатирующую ванну. Диффузионная ячейка состоит из двух щелевых трубопроводов 9, соединенных набором капилляров 8. Щелевые трубопроводы, изготовленные из параллельных пластин (нержавеющая сталь), сваренных в атмосфере аргона обеспечивают надежную работу при повышенных температурах. В пластинах имеются штуцеры, предназначенные для ввода и вывода газа, и штуцеры, расположенные в центре сборки для подключения микроманометра. Набор цилиндрических капилляров представляет трубки из нержавеющей стали (инъекционные иглы) внутренним диаметром  $0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и длиной  $75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .



**Рис. 2** Схема экспериментальной установки:

- 1 – баллоны с исследуемыми газами; 2 – система редукторов;  
 3 – осушители; 4 – система моностатов; 5 – буферные баллоны;  
 6 – сглаживающие капилляры; 7 – реометры; 8 – набор капилляров;  
 9 – щелевые трубопроводы; 10 – термостатирующие рубашки;  
 11 – 14 – камеры и кюветы первого интерферометра ИТР-1;  
 15, 16 – камеры второго интерферометра; 17, 18 – выходы смеси газов в атмосферу; 19 – миллиметровая шкала

Анализ смеси газов после диффузии проводился двумя интерферометрами ИТР-1 (типа Рэлея). Применение двух интерферометров позволяет вести непрерывный контроль за составом смеси и наблюдать за процессом выравнивания объемных и массовых потоков. В наших исследованиях применялись метровые кюветы, что способствует увеличению чувствительности прибора. В одном интерферометре использовались две полуметровые кюветы (при анализе они соединялись последовательно, образуя метровую кювету), для выравнивания объемных скоростей исследуемых газов. Кюветы интерферометров и реометры термостатированы.

Для исследования диффузии при повышенных температурах диффузионная ячейка была помещена в специально изготовленную электропечь. Электрическая схема экспериментальной установки приведена в работе [2]. Нагревательная обмотка электропечи питалась через автоматический выключатель типа А 3161 от стабилизатора марки С-3С, который поддерживал необходимое напряжение с точностью  $\pm 1$  В. Регулировка заданной температуры в электропечи осуществлялась и поддерживалась автоматическим электронным потенциометром ЭПД-120 С через магнитный пускатель ПА-323 и термопару хромель-алюмель.

В электропечи имеются три нагревателя, выполненные из сплава СИ-235, подключенные параллельно. Максимальная мощность печи 4,2 кВт. Специальные измерения показали, что однородность поля поддерживалась с точностью  $\pm 0,5^\circ$  во всем рабочем объеме диффузионной ячейки. При выполнении эксперимента задавалась определенная температура на автоматическом электронном потенциометре и с помощью автотрансформатора в электропечь подводился ток определенной силы. Величина тока измерялась с точностью  $\pm 0,1$  А, а напряжение  $\pm 1$  В с помощью измерительных приборов. Температура в печи измерялась платино-платинородиевой термопарой, подключенной к потенциометру Р-330. Печь выходила на стационарный режим в течение двух-трех часов. Для того, чтобы исследуемые газы принимали температуру опыта, они поступали в диффузионную ячейку через медный змеевик длиной 2,5 м и внутренним диаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м, находящийся в печи. Отдельные узлы экспериментальной установки соединены резиновыми трубками, внутренняя поверхность которых смазана силиконовым маслом для исключения поглощения исследуемых газов резиной.

Измерения коэффициентов диффузии в различных системах отсчета позволило проверить формулу Мейера и определить бародиффузионные постоянные смеси газов. Решение системы уравнений Больцмана для идеального газа с постановкой граничных условий для функции распределения позволяет определить коэффициент диффузионного скольжения  $\delta$  и бародиффузионную постоянную  $\sigma_p$  и доказать, что эти коэффициенты равны.

## Список литературы

- 1 Альжанов К.З. Исследование диффузионного бароэффекта бинарных смесей / К.З. Альжанов. // «Промышленная теплотехника». 2003. Т. 25, № 4. С. 282 – 284.
- 2 Альжанов К.З. Истинные коэффициенты диффузии некоторых пар газов / К.З. Альжанов // ИФЖ. Минск. 1998. Вып. 4. Т. 71. С. 710 – 717.
- 3 Alsharov K.Z. Diffusion coefficients in various frames of reference «Russian Journal of Engineering Thermo-physics» / K.Z. Alsharov. 1996. Vol. 6, № 4. P. 383 – 400.
- 4 Косов Н.Д. К определению коэффициента диффузии газов в различных системах отсчета / Н.Д. Косов // Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ-мат. 1970. № 6. С. 15 – 23.

**В.В. Ветров, Д.В. Дубровский**

Тульский государственный университет

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СНАРЯДА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

Как отмечалось ранее [1], вращение снаряда на траектории в условиях аэродинамического нагрева приводит к интенсификации процессов теплопереноса через воздушные прослойки, прилегающие к нагретым элементам, за счет возникновения свободной конвекции в инерционных полях центробежных массовых сил. Проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили правильность данного вывода и приемлемость приведенных расчетных зависимостей для количественной оценки теплопереноса в указанных условиях.

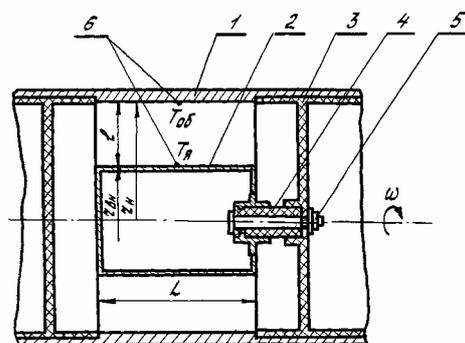
На основе выявленного эффекта и предложенной зависимости [1]

$$\varepsilon_{\text{к.вр}} = 0,228 [Ra_{\text{вр}}^*]^{0,226};$$

здесь

$$Ra_{\text{вр}}^* = \frac{[g + \omega^2 r_{\text{ср}}] \Delta T l^4}{T_{\text{ср}} \nu \alpha_{\text{вр}}},$$

$r_{\text{ср}}$  – радиальная координата центра воздушной прослойки, устанавливающей количественную связь между центробежным ускорением и коэффициентом конвекции воздушной прослойки, представляется возможность разработать способ определения скорости вращения высокоскоростных снарядов на траектории, основанный на измерении температур внутренней поверхности обтекателя и специального тепломера, установленного относительно обтекателя с равномерным радиальным зазором. Указанный способ можно реализовать следующим образом. В телеметрическом отсеке соосно продольной оси снаряда устанавливается тепломер – тонкостенный замкнутый цилиндр, изготовленный из меди или алюминиевого сплава, не имеющий непосредственного теплового контакта с корпусом снаряда (рис.1).



**Рис. 1 Устройство телеметрического блока для определения скорости вращения:**

1 – обтекатель; 2 – тепломер; 3 – экран; 4 – изолятор;  
5 – элемент крепления; 6 – термопары

Обтекатель снаряда в месте установки тепломера должен иметь внутреннюю поверхность цилиндрической формы с минимальной степенью черноты, не изменяющейся за время полета.

Это же требование относится и к наружной поверхности тепломера. На внутренней поверхности обтекателя и на цилиндрической стенке тепломера устанавливаются термопары, значения термо-э.д.с. которых записываются во время полета снаряда бортовым телеметрическим устройством. После расшифровки телеметрической записи получают зависимости  $T_{об} = f(\tau)$  и  $T_{я} = \varphi(\tau)$  (рис. 2), по которым для каждого фиксированного промежутка времени определяют скорость нагревания тепломера  $B(i) = \frac{\Delta T_{я}(i)}{\Delta \tau}$ , температурный перепад в прослойке  $\Delta T(i)$  и рассчитывают лучистый тепловой поток к тепломеру

$$Q_{л}(i) = 5,67 \cdot 10^{-8} \varphi \varepsilon_{п} F_{я} (T_{об}^4(i) - T_{я}^4(i)),$$

где  $\varepsilon_{п}$  – приведенная степень черноты, рассчитывается по зависимости:

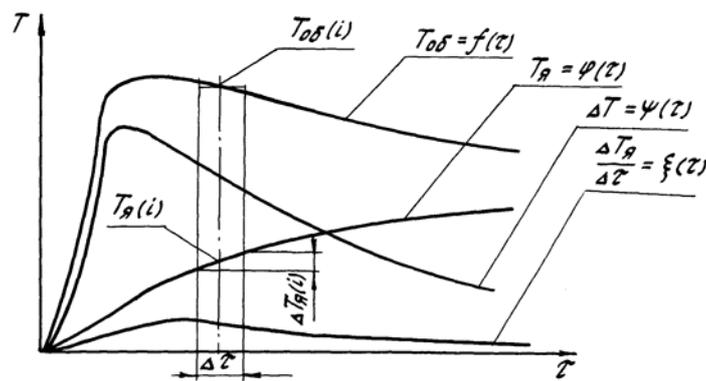
$$\varepsilon_{п}(j) = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{об}} + \left( \frac{1}{\varepsilon_{я}} - 1 \right)},$$

здесь  $\varepsilon_{об}$  и  $\varepsilon_{я}$  – соответственно, степень черноты внутренней поверхности оболочки и наружной поверхности ядра, и уточняется экспериментально в наземных условиях. Зная значения указанных величин, среднюю угловую скорость вращения на каждом фиксированном отрезке времени определяют по формуле

$$\omega(i) = \sqrt{\frac{n(i)g}{r_{cp}}},$$

где  $n(i)$  – центробежная перегрузка, определяемая формулой

$$n(i) = 0,424 \left[ \frac{C_{я} \cdot B_{я}(i) - Q_{л}(i) l_n \frac{r_{н}}{r_{вн}}}{L} \right]^{4,425} \cdot \frac{r_{вн}}{\Delta T^{5,425} l^4} - 1.$$



**Рис. 2** Тепловой режим телеметрического блока

Аппроксимируя полученный ряд значений  $\omega(i)$ , можно получить искомую зависимость  $\omega = f(\tau)$ .

Рассмотренный способ определения скорости вращения снаряда на траектории может найти применение на этапе летной отработки высокоскоростных самонаводящихся снарядов. Данный способ можно распространить и на снаряды с дозвуковой скоростью полета, если в качестве нагревателя наружной, относительно тепломера, обечайки использовать, например, нагретые элементы конструкции РДТТ или специальные пиротехнические устройства.

### *Список литературы*

1 Ветров В.В. Интенсификация теплопереноса через воздушные прослойки в условиях осевого вращения и внешнего нагревателя / В.В. Ветров // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой международной теплофизической школы (24–28 сент. 2001 г.) / ТГТУ. Тамбов, 2001. Ч. 1. С. 27 – 33.

*В.Я. Губарев*

*Липецкий государственный технический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКАХ**

Газожидкостное (в основном, водовоздушное) охлаждение высокотемпературных поверхностей широко используется в различных элементах энергетического оборудования, при вторичном охлаждении непрерывнолитого слитка в металлургии. Теплообмен при взаимодействии двухфазного потока с высоконагретой поверхностью металла носит сложный характер и зависит от параметров потока и температуры поверхности.

Организация требуемых режимов охлаждения, обеспечение необходимого теплоотвода от охлаждаемой поверхности при минимизации энергозатрат требует качественной и количественной оценки влияния параметров газожидкостных потоков на процесс теплообмена. Экспериментальные данные по изучению этого процесса обычно представляют в виде простых линейных зависимостей коэффициента теплоотдачи от плотности орошения [1].

Теоретические исследования в области теплообмена в газожидкостной среде немногочисленны [2, 3] и используют, в основном, численные решения дифференциальных уравнений теплообмена. Сформулировать требования к взаимосвязанным параметрам газожидкостного потока, обеспечивающим необходимые коэффициенты теплоотдачи, возможно только на основе аналитических решений дифференциальных уравнений сохранения для двухфазного потока или полученных в результате их теоретического анализа критериальных уравнений.

Рассмотрим теплообмен в тонкодисперсных (гидродинамически однородных) газожидкостных потоках. При анализе воспользуемся гомогенной моделью, суть которой состоит в замене реальной двухфазной среды гидродинамически гомогенной сплошной средой (смесью), имеющей средние эквивалентные параметры: плотность смеси, вязкость смеси. Для такой гомогенной смеси правомерны обычные дифференциальные уравнения сплошной среды.

Газожидкостные потоки, используемые при охлаждении горячего металла, характеризуются высоким уровнем температуры поверхности отвода тепла (600 ... 1200 °С) и влагосодержанием 10 ... 50 кг/кг, при распространении теплового потока теплопроводностью в таких потоках имеет место разрыв температур фаз, т.е. температура газа  $t_r$  в слое существенно отличается от температуры капель  $t_k$  в том же слое. Отдельную каплю можно представить как точечный сток тепла и распространение тепла теплопроводностью в газожидкостной среде описывается известным дифференциальным уравнением теплопроводности с внутренними отрицательными источниками тепла. В случае охлаждения горячего металла процессы теплопроводности в газожидкостной среде около поверхности металла протекают при  $t_r \gg t_k$ , сопровождаются испарением капель и, с учетом теплоты на нагрев выделяющегося с поверхности капель пара, описывается системой уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a(t_r)} \frac{\partial t_r}{\partial \tau} &= \nabla^2 t_r - b_0^2 \frac{d_k}{d_{k0}} (t_r - t_k) - C_n \frac{\partial d}{\partial \tau} \rho_r (t_r - t_s); \\ \frac{\partial t_k}{\partial \tau} &= \frac{12\lambda_r}{C_k \rho_k d_k^2} (t_r - t_k), \quad t_k \leq t_s, \quad d_k = d_{k0}; \\ \frac{\partial d_k}{\partial \tau} &= \frac{4\lambda_r}{r \rho_k d_k} (t_r - t_k), \quad t_k = t_s, \quad d_k > 0; \\ \frac{\partial d}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_r b_0^2}{r \rho_r} \frac{d_k}{d_{k0}} (t_r - t_s), \quad t_k = t_s, \quad d_k > 0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $b_0^2 = \frac{12d_0\rho_r}{\rho_k d_{k0}^2}$ ;  $d_0$  – начальное влагосодержание, кг/кг;  $d_{k0}$  – начальный диаметр капель, м;  $t_s$  – температура насыщения жидкости, °С (100 °С для водовоздушной смеси);  $C_n$  – теплоемкость пара, Дж/(кг · К).

Решение системы уравнений (1) возможно только численными методами. Но любые численные решения имеют частный характер. Для анализа процессов теплообмена желательно иметь аналитическое решение.

Аналитическое решение системы уравнений (1) для одномерного процесса теплопроводности можно получить при допущениях:  $t_k = \text{const}$  и  $d_k = \text{const}$ . В этом случае система уравнений (1) при граничных условиях:  $x=0$ ,  $\vartheta = \vartheta_0 = t_n - t_s$ ;  $x=\infty$ ,  $\vartheta = 0$ , где  $t_n$  – температура охлаждаемой поверхности,  $\vartheta = t_r - t_s$ , имеет аналитическое решение в виде

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-bx}. \quad (2)$$

Характерная толщина слоя, в котором температурный напор  $\vartheta$  уменьшается до  $0,05 \vartheta_0$  (тепловой пограничный слой), определяется как  $\delta_T = -\frac{\ln 0,05}{b} = \frac{\ln 20}{b} = \frac{3}{b}$ . Характерная относительная толщина теплового погранслоя  $\delta^* = \frac{\delta_T}{d_k} = 3 \sqrt{\frac{\rho_k}{12d\rho_b}}$ . При наиболее распространенных значениях влагосодержания

10 ... 20 кг/кг толщина теплового погранслоя составляет 5 ... 7 диаметров капель, т.е. от 0,05 до 0,7 мм для тонкодисперсных водовоздушных смесей (диаметр капель 0,01 ... 0,1 мм). Плотность теплового потока от высокотемпературной поверхности в двухфазную среду определяется как  $q = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx} \Big|_{x=0}$ , с учетом

уравнения (2)  $q = \lambda b \vartheta_0$ . Плотность теплового потока удобнее рассчитывать с использованием коэффициента теплоотдачи по формуле Ньютона  $q = \alpha \vartheta_0$ , тогда коэффициент теплоотдачи, отнесенный к температурному напору  $\vartheta_0 = t_n - t_s$ ,  $\alpha = \lambda b$ . Полученное выражение для определения коэффициента теплоотдачи можно представить в безразмерной форме, используя соответствующие критерии подобия  $Nu = \frac{\alpha d_k}{\lambda_r}$  (критерий Нуссельта) и  $D = \frac{d\rho_r}{\rho_k}$  – относительный объем капель в двухфазном потоке (относительное влагосодержание). Тогда критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи

$$Nu_{db} = 3,46 D^{0,5}. \quad (3)$$

Допущение  $d_k \approx \text{const}$ , позволяющее рассматривать процесс теплопроводности квазистационарным, выполняется лишь в течение некоторого времени прогрева капли до температуры насыщения, так как в процессе теплообмена капель с газом при его температуре выше температуры насыщения жидкости происходит испарение капель и уменьшение ее диаметра вплоть до полного испарения. Время квазистационарного режима из условия прогрева капель в тепловом погранслое и с учетом уточнения постоянного коэффициента на основе решения системы уравнений (1) методом конечных элементов находится как

$$\tau_s = 0,12 \frac{\Delta i \rho_k d_{k0}^2}{\lambda_r \vartheta_0}, \quad (4)$$

где  $\Delta i$  – удельная теплота прогрева капель.

Выражение (4) можно представить в безразмерном виде, если ввести условный коэффициент температуропроводности теплового взаимодействия капли с газом  $a^k = \frac{\lambda_r \vartheta_0}{r \rho_k}$ , где – удельная теплота парообразования, Дж/кг. Тогда критерий Фурье для газожидкостной среды  $Fo^k = \frac{a^k \tau}{d_{k0}^2}$  и характерное время можно определить при помощи безразмерного уравнения

$$Fo_s^k = \frac{a^k \tau_s}{d_{k0}^2} = 0,12 \frac{\Delta i}{r} = 0,02. \quad (5)$$

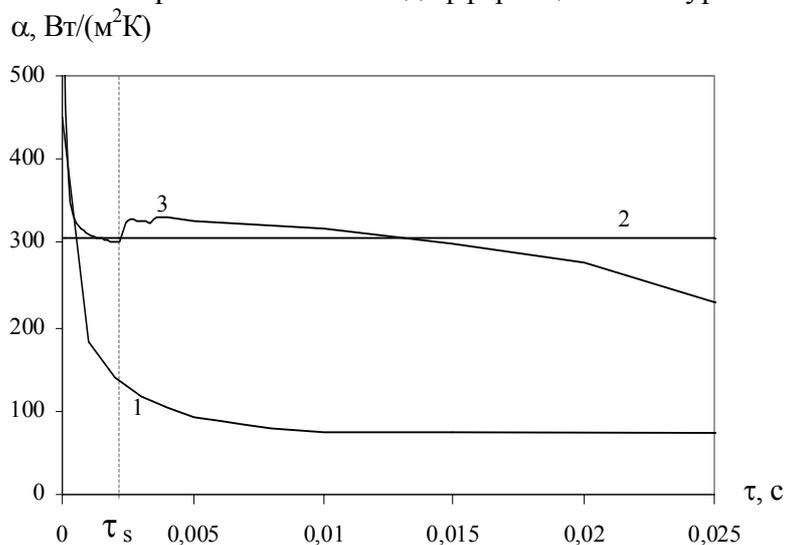
Время полного испарения капель  $\tau_0$  оценим с точностью до постоянного коэффициента аналогично времени прогрева капель по критериальной формуле (5) с подстановкой теплоты нагрева жидкости и парообразования  $\Delta i_0$  и уточнением постоянного коэффициента из численного решения системы уравнений (1)

$$Fo_0^k = \frac{a^k \tau_0}{d_{k0}^2} = 0,22 \frac{\Delta i_0}{r} = 0,25. \quad (6)$$

В ходе квазистационарного периода и периода испарения капель в прилегающем к высокотемпературной поверхности слое коэффициент теплоотдачи меняется и его величину можно найти из численного решения системы (1). Для определения среднего коэффициента теплоотдачи за период испарения удобно использовать критериальное уравнение (3), которое после уточнения постоянного коэффициента на основе осреднения результатов численного расчета, принимает вид

$$Nu_{db} = 3,0D^{0,5}. \quad (7)$$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости от времени коэффициента теплоотдачи при охлаждении высокотемпературной поверхности водовоздушной средой. Температура поверхности 1000 °С, начальная температура среды 20 °С, влагосодержание 10 кг/кг, диаметр капель 50 мкм. 1 – коэффициент теплоотдачи в неподвижную воздушную среду, 2 – средний коэффициент теплоотдачи по критериальному уравнению (7), 3 – численное решение системы дифференциальных уравнений (1).



## Рис. 1

При времени процесса, превышающем  $\tau_0$ , необходимо решать систему уравнений (1) с учетом образования на высокотемпературной поверхности однофазного парогазового слоя.

### Список литературы

- 1 Урбанович Л.И., Горяинов В.А., Севостьянов В.В. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1981. № 3. С. 156 – 160.
- 2 Терехов В.И. Тепломассообмен в двухкомпонентном развитом турбулентном газопарокапельном потоке / В.И. Терехов, М.А. Пахомов, А.В. Чичиндаев // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2 С. 56.
- 3 Губарев В.Я. Исследование процесса теплообмена при взаимодействии водовоздушного потока с поверхностью непрерывнолитого слитка / В.Я. Губарев, Е.А. Мосин, О.Н. Ермаков, В.И. Лебедев, В.П. Логинов // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 12. С. 12.

*В.Я. Губарев, Ю.В. Шацких*

Липецкий государственный технический университет

### КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Регенеративные теплообменные аппараты (РТА) широко используются в металлургии, теплоэнергетике и других отраслях промышленности. РТА представляют собой системы периодического действия, в которых теплообмен между нагреваемой и греющей средами осуществляется через промежуточный теплоноситель – насадку. В течение рабочего цикла последовательно происходит нагрев и охлаждение насадки газообразными или жидкими теплоносителями, при этом температура меняется и по времени и по объему насадки. Несмотря на общий принцип действия данные теплообменники отличаются большим конструктивным разнообразием.

К настоящему времени РТА достаточно хорошо исследованы. Во многих работах рассмотрены возможности усовершенствования их конструкции, режимов работы, предложено большое количество математических моделей, пописывающих процессы теплообмена в РТА. Однако стоит отметить, что практически все имеющиеся исследования привязаны к какой-либо одной конструкции регенеративных теплообменников и авторы не делают попытки распространить полученные результаты на другие типы РТА. Большинство работ посвящено повышению эффективности работы регенераторов, однако критерием эффективности служат совершенно различные величины. Для одних аппаратов (например, доменных воздухонагревателей) – это температура нагрева холодного теплоносителя (доменного дутья). Для других (например, вращающихся воздухоподогревателей) – КПД.

Целью данной работы является поиск обобщенного метода анализа теплообмена в РТА, который позволил бы определять оптимальные параметры и размеры насадки, а также определять рациональные режимы работы.

Рассмотрим РТА с противоточным движением теплоносителей. Насадка имеет высоту  $H$ . Расход теплоносителей отнесем к площади поперечного сечения насадки  $F$ . Запишем одномерную задачу теплообмена между насадкой и газообразным теплоносителем для слоя  $dx$ . Примем, что температура поверхности насадки связана со средней температурой слоя коэффициентом массивности  $m$ .

Регенеративный теплообмен в РТА, как в период охлаждения насадки, так и в период нагрева можно описать системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} + Q_i^* \frac{\partial t}{\partial x} &= \frac{\alpha_i f_0}{Cm} v(x, \tau); \\ \frac{\partial t_i}{\partial x} + \frac{1}{Q_i^*} \frac{\partial t_i}{\partial \tau} &= \frac{\alpha_i f_0 \rho^*}{C_i Q_i^*} v(x, \tau); \\ v(x, \tau) &= t_i(x, \tau) - t(x, \tau), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $t$  – текущая температура насадки, °С;  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата вдоль вертикальной оси;  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C$  – теплоемкость насадки, Дж/(кг·К);  $m$  – коэффициент массивности насадки;  $C_i$  – теплоемкость теплоносителей, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $f_0$  – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/кг;  $Q_i^*$  – приведенный расход теплоносителей, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho^*$  – плотность насадки, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – температурный напор между теплоносителем и насадкой, °С;  $i = 1$  – холодный теплоноситель;  $i = 2$  – горячий теплоноситель.

Условия однозначности:

- для периода охлаждения при  $\tau = 0$ ,  $t_H = t_{21}$ , при  $\tau = \tau_1$ ,  $t_H = t_{12}$ ;
- для периода нагрева при  $\tau = 0$ ,  $t_{H=0} = t_{11}$ , при  $\tau = \tau_2$ ,  $t_{H=0} = t_{22}$ ;
- начальное распределение температуры насадки описывается функцией  $t = \varphi(x)$ , теплофизические свойства насадки определяются в соответствии с ее температурой, приведенный расход теплоносителя  $Q_i^*$  (на 1 м<sup>2</sup> насадки) и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$  постоянны в течении всего периода. Здесь  $t_{i1}$  – температура теплоносителей на входе в насадку, °С;  $t_{i2}$  – теплоносителей на выходе из насадки, °С.

Очевидно, что в каждый момент времени интенсивность теплообмена между насадкой и теплоносителем определяется средним по всей высоте насадки коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{cp}$  и средним температурным напором  $v_{cp}$ . При прочих равных условиях максимальный средний температурный напор имеет место в случае постоянного по всей высоте насадки локального температурного напора, т.е.  $v = \text{const}$ . В свою очередь, выполнение этого условия возможно только в случае линейного распределения по высоте и температуры насадки и температуры теплоносителя. Таким образом, режим нагрева (охлаждения) насадки при  $v = \text{const}$  характеризуется зависимостью только от времени температуры как насадки, так и теплоносителя, причем сохраняется линейное распределение температур по высоте насадки. В этом случае мы имеем регулярный режим нагрева (охлаждения) насадки [1].

Для регулярного режима работы РТА изменение температуры насадки в любом слое равно изменению ее средней температуры по всей высоте, что позволяет перейти от дифференциальной формы уравнений регенеративного теплообмена к интегральной. Например, в течение времени периода  $\tau_i$  изменение температуры насадки составит

$$\Delta t_i = \frac{C_i Q_i^* \tau_i}{Cm \rho^* H} (t_{i2} - t_{i1}). \quad (2)$$

При этом температурный напор равен

$$v_i = \frac{C_i Q_i^*}{\alpha_i \rho^* f_0 H} (t_{i2} - t_{i1}). \quad (3)$$

Безразмерные комплексы в правых частях уравнений (2) и (3) являются критериями подобия РТА. Критерий  $Gv = C_i Q_i^* \tau_i / Cm \rho^* H$  представляет собой соотношение между тепловоспринимающей способностью теплоносителя и теплоаккумулирующей способностью насадки, а критерий  $Jv = C_i Q_i^* / \alpha_i \rho^* f_0 H$  – соотношение между тепловоспринимающей способностью теплоносителя и интенсивностью конвективного теплообмена. Здесь  $H$  – высота насадки, м.

Анализ дифференциальных уравнений позволяет получить также критерий  $Jm = Cm / \alpha_i f_0 \tau_i$ , который представляет собой соотношение между теплоаккумулирующей способностью насадки и интенсивностью конвективного теплообмена,  $Jv = Gv \cdot Jm$ .

Предлагаемые критерии дают возможность простого расчета характеристик РТА. Предложенный критериальный анализ регенеративного теплопереноса для регулярного режима позволяет выявить связи между всеми теплофизическими, конструктивными и режимными параметрами РТА. Обобщенная, безразмерная форма критериальных уравнений дает возможность выбора требуемых параметров любых

РТА в зависимости от предъявляемых требований и оптимизации как характеристик насадки, так и режимов работы.

Разумеется, предлагаемый регулярный режим работы РТА требует определенных условий для реализации. Строго линейное распределение температур насадки и теплоносителей возможно только при соответствующем изменении температур теплоносителей на входе в насадку в течение периода, что не всегда осуществимо. При правильном выборе режимных параметров масса (объем) участка с нерегулярным режимом может составлять не более 2 – 3 % массы (объема) всей насадки.

Следует отметить, что подавляющее большинство РТА в настоящее время не используют регулярный режим, в частности, до 15 – 20 % насадки доменных воздухонагревателей нагрева перегревается вплоть до входной температуры греющего теплоносителя и примерно такая же часть насадки переохлаждается до входной температуры холодного теплоносителя.

### Список литературы

1 Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. М.: ГИТТЛ, Гостехиздат, 1954. 408 с.

*И.Н. Ищук, А.И. Фесенко*

Тамбовский военный авиационный инженерный институт

### ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ СОПРЯЖЕНИЯ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В докладе представлена математическая модель нестационарной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами и внутренним источником тепла с учетом наличия контактного термического сопротивления (КТС), конечной длительности теплового импульса и влияния волновых явлений теплопроводности. Сопоставлены результаты моделирования и эксперимента.

Рассмотрим физическую модель. Два полуограниченных в тепловом отношении материала с различными теплофизическими свойствами (ТФС) (теплопроводность  $\lambda_1$ , температуропроводность  $a_1$  одного,  $\lambda_2$  и  $a_2$  другого) приведены в контакт, который создает термическое сопротивление. В плоскости контакта параллельно размещены линейный импульсный источник тепла (микропровод из нихрома) и датчик температуры (термопара сваренная в стык).

На основе физической модели построим методом конечных разностей (МКР) разностные схемы двумерной задачи теплопроводности с граничным условием сопряжения.

Двумерная краевая задача теплопроводности в твердом теле, описывается линейными дифференциальными уравнениями с частными производными:

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a_i \left( \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad I = 1, 2, \quad (1)$$

граничные условия:

$$T(r, z, 0) = 0, \quad T(r, +0, \tau) = T(r, -0, \tau), \quad T(r, \pm\infty, \tau) \rightarrow 0;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0+} - \lambda_2 \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0-} = Q \delta(z) \delta(r) \delta(\tau), \quad (2)$$

где  $Q$  – количества тепла;  $T$  – температура;  $\tau$  – время;  $r$  – координата в плоскости контакта двух мате-

риалов;  $z$  – координата в плоскости перпендикулярной контактной плоскости.

Решение данной задачи представлено в работе [1].

Приведенное решение ограничено требованием неравенства  $\frac{\lambda_1^2}{a_1} \neq \frac{\lambda_2^2}{a_2}$ , не учитывает КТС, конечную

длительность теплового импульса. Для нахождения приближенного решения поставленной задачи можно применить численные методы [2].

Полагая, что изотермические поверхности будут параллельны линии источника тепла, для численного решения введем сеточную функцию  $T_{m,n}^k$ , соответствующую температуре

$$T(r_m, z_n, \tau_k), \quad r_m = (m-1)h, \quad z_n = (n-1)h, \quad \tau_k = k\Delta.$$

Разностная схема для двумерного уравнения теплопроводности имеет вид

$$T_{m,n}^{k+1} = \left(1 - \frac{4\Delta\tau a_{1,2}}{h^2}\right) T_{m,n}^k + \frac{a_{1,2}\Delta\tau}{h^2} T_{m\pm 1, n\pm 1}^k, \quad (3)$$

где  $T_{m\pm 1, n\pm 1}^k = T_{p, m-1, n}^k + T_{p, m+1, n}^k + T_{p, m, n-1}^k + T_{p, m, n+1}^k$ .

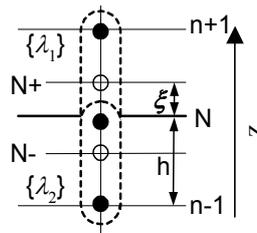
Рассмотрим аппроксимацию условий сопряжения.

В случае неидеального теплового контакта условие сопряжения (2) уточняется выражением [3]:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{-z_0} = \frac{1}{R} (T_2 \Big|_{+z_0} - T_1 \Big|_{-z_0}),$$

где  $R$  – КТС;  $\alpha = \frac{1}{R}$  контактная термическая проводимость.

Аппроксимируя разностную схему (рис. 1), при  $\xi \rightarrow 0$  в точке  $N$  имеем разрыв первого рода, однако в реальных измерениях в точке  $N$  изменение температуры не имеет разрыва, соответственно принято, что абсолютная температура в плоскости контакта между точками  $-N$  и  $+N$  изменяется по линейному закону.



**Рис. 1** Шаблон аппроксимации условий сопряжения

Разностная схема аппроксимируется выражением [4]:

$$T_N^k = \frac{1}{2(\alpha h \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2 + \alpha h \lambda_2)} \left[ (2\alpha h \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2) T_{N-1}^k + (2\alpha h \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2) T_{N+1}^k \right].$$

Однако, результаты математического моделирования и натурального эксперимента разнятся из-за проявления волновых явлений теплопроводности. Так, в работе [5] предложено использовать уравнение теплопроводности гиперболического типа, которое можно представить в виде

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T - \frac{a}{\lambda} \psi(r, z) e^{-\tau/\lambda} \quad (4)$$

$\psi(r, z)$  – функция источника тепла в пространстве.

В этом случае, используя решение уравнения (4) и подбирая определенное значение  $\chi$ , можно устранить противоречие теоретических данных с опытными. Соответственно, используя данное выражение, функцию источника тепла перепишем в виде

$$q(r, z, \tau) = \begin{cases} q, & \tau \leq \tau^* \\ q \exp\left\{\frac{(\tau - \tau^*)}{\chi}\right\}, & \tau > \tau^* \end{cases} \quad (5)$$

где  $\tau^*$  – длительность теплового импульса.

В ряде работ показано, что для решения инженерных задач нелинейной теплопроводности зависимость  $\lambda(T)$ ,  $a(T)$  в диапазоне абсолютных температур (0, 250) °С с высокой степенью достоверности аппроксимируется линейной функцией. В расчетах приняты зависимости:

$$\lambda(T) = \lambda(25^\circ\text{C})(1 + 0,001 \cdot T), \quad a(T) = a(25^\circ\text{C})(1 - 0,005T).$$

По результатам натуральных экспериментов, при тех же параметрах физической модели, получены данные по измерению температуры в точке контроля  $r = 1,63 \cdot 10^{-3}$  м;  $a_1(25^\circ\text{C}) = 8,3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_1(25^\circ\text{C}) = 1,337$  Вт/м·К (кварцевое стекло) и  $a_1 = (25^\circ\text{C}) 1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_1(25^\circ\text{C}) = 0,026$  Вт/м·К (рипор);  $a_2 = 2,92 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_2 = 0,05$  Вт/м·К (Кремнеземное составляющее связующее бетонит – КССБ);  $\lambda_3 = 60(25^\circ\text{C})$  Вт/м·К (ХК термопара);  $h = 545 \cdot 10^{-6}$  м;  $q = 183$  кДж/м;  $\alpha = 3310$  Вт/м·К;  $\Delta = 10$  мс;  $\tau^* = 250$  мс;  $\chi = 1.1$ .

После фильтрации измерительного сигнала и замены экспериментальных точек кубической сплайн-интерполированной функцией, среднеквадратическое отклонение моделирования МКР и натурального эксперимента на интервале времени 1,5 ... 4 с. составило менее 20 %.

Таким образом, полученные разностные уравнения учитывающие наличие контактного термического сопротивления могут быть использованы для разработки активных методов неразрушающего теплового контроля и дефектоскопии.

### Список литературы

- 1 Фесенко А.И. Частотно-импульсный метод определения теплофизических характеристик твердых материалов / А.И. Фесенко, С.С. Маташков // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 2. С. 338.
- 2 Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи, Методы, Примеры: 2-е изд. испр. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 320 с.
- 3 Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. / Э.М. Карташов. М.: Высш. шк., 2001. 550 с.
- 4 Ищук И.Н. Математическое моделирование задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: VII Всероссийская НТК. 27-29 апр. 2004 г. Тамбов, 2004. Ч. 2. С. 200 – 210.
- 5 Шашков А.Г. Волновые явления теплопроводности: Системно-структурный подход: Изд. 2-е, доп. / А.Г. Шашков, В.А. Бубнов, С.Ю. Яновский. М.: Едиториал УРСС, 2004. 296 с.

**Ю.И. Кудинов, Е.А. Халов, С.А. Сулова**

Липецкий государственный технический университет

### НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОКАТА\*

\* Работа поддержана РФФИ по проекту 04-01-00816.

Важный завершающий этап формирования физико-механических свойств стальной полосы на стане горячей прокатки протекает в дулирующей установке, схема которой представлена на рис. 1.

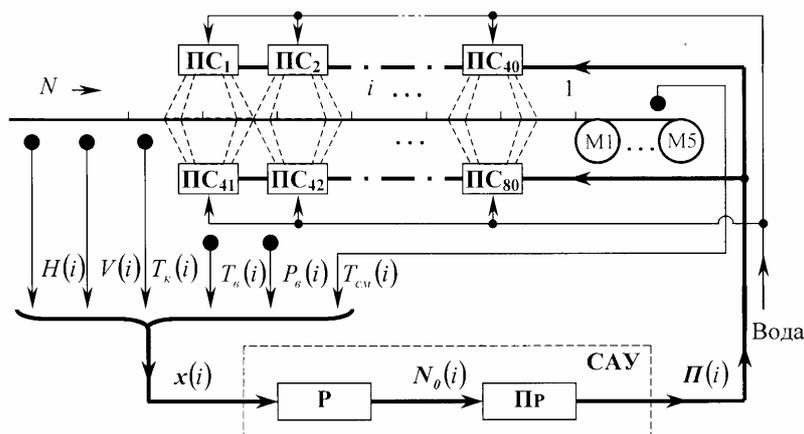


Рис. 1 Схема управления дулирующей установкой

Дулирующая установка оснащена системой автоматического управления (САУ), реализованной на базе управляющей вычислительной машины и состоящей из регулятора (Р) и преобразователя (Пр).

В зависимости от толщины  $H(i)$  и скорости  $V(i)$  полосы, температуры конца прокатки  $T_k(i)$ , температуры  $T_b(i)$  и давления  $P_b(i)$  воды регулятор Р определяет количество  $N_0(i)$  полусекций  $ПС_1, ПС_2, \dots$ , подлежащих включению и обеспечивающих требуемую близость текущей  $T_{cm}(i)$  и номинальной  $T_{cm}^H$  температуры сматки в точках  $i = \overline{1, N}$ .

Преобразователь Пр формирует последовательность  $\Pi(i) = (u_{\Pi 1}(i), u_{\Pi 2}(i), u_{\Pi 3}(i), \dots, u_{\Pi 80}(i))$  двоичных переменных  $u_{\Pi l} = \{0, 1\}$ ,  $l = \overline{1, 80}$ , воздействующих на электромагнитные клапаны, пропускающие воду в выбранные полусекции. Если  $u_{\Pi l}(i) = 1$ , то электромагнитный клапан  $l$ -ой полусекции открыт, т.е. она включена. В противном случае, при  $u_{\Pi l}(i) = 0$ , клапан  $l$ -й полусекции считается закрытым, а она выключенной.

В настоящей работе предлагается в качестве преобразователя использовать нейронную сеть, способную обучаться на значительном числе оптимальных последовательностей, запоминать их, а затем восстанавливать в процессе управления.

Выходом нейронной сети является двоичная последовательность сигналов  $\Pi(i) = \{u_{\Pi 1}(i), u_{\Pi 2}(i), u_{\Pi 3}(i), \dots, u_{\Pi 80}(i)\}$ , зависящая от переменных  $H(i), V(i), T_k(i), N_0(i)$ , образующих вектор  $x_{\Pi}(i)$ .

Для повышения эффективности обучения была проведена модификация нейронной сети (рис. 2), заключающаяся в декомпозиции пространства выходов на 8 подмножеств  $\Pi_1(i), \Pi_2(i), \dots, \Pi_8(i)$ , каждое из которых состоит из 10 двоичных выходов.

Такой подход позволяет сформировать 8 независимых по промежуточному и выходному слою нейронных сетей, причем каждая из них обладает гораздо меньшей размерностью, чем исходная трехслойная нейронная сеть с 4 входами и 80 выходами.

Входной слой сети содержит четыре нейрона, принимающих компоненты вектора входных переменных

$$x_{\Pi}(i) = (x_{\Pi 1}(i), x_{\Pi 2}(i), x_{\Pi 3}(i), x_{\Pi 4}(i)) = (H(i), V(i), T_k(i), N_0(i))$$

и вычисляющих их нормализованные значения с помощью сигмоидной функции (сигмоиды) [1, 2]

$$\bar{x}_{\Pi q}(i) = \left( 1 + \exp^{-x_{\Pi q}(i)} \right)^{-1}.$$

Затем нормализованные выходные значения нейронов этого слоя передаются на входы нейронов скрытых слоев в подсетях  $НС^1, \dots, НС^8$ .

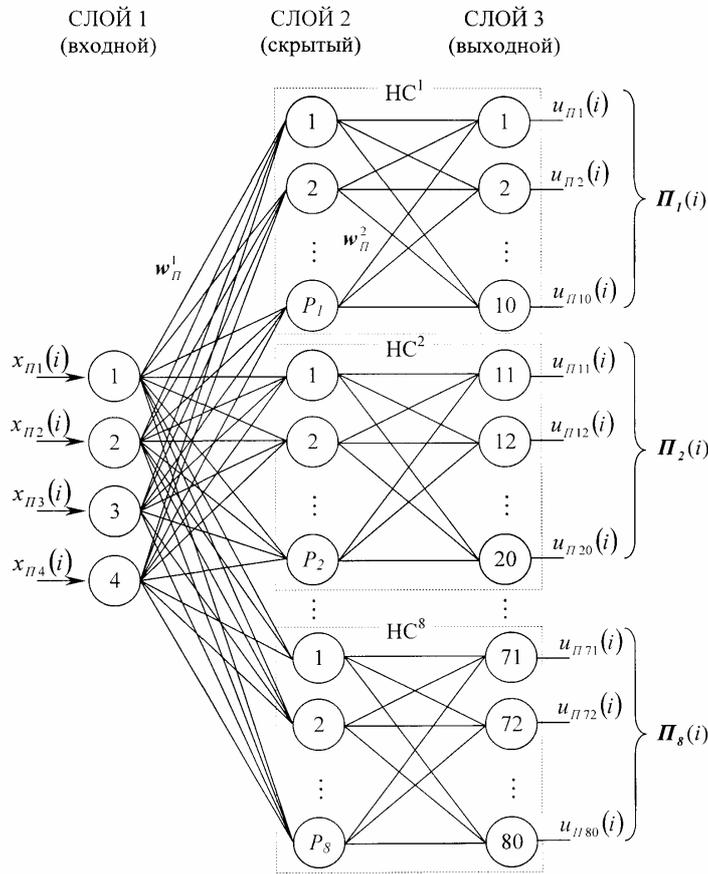


Рис. 2 Модифицированная нейронная сеть

В скрытом слое каждой подсети содержится определенное количество нейронов, равное  $p_\lambda$ ,  $\lambda = \overline{1, 8}$ . На входы этих нейронов поступают взвешенные суммы сигналов с выходов 1-го слоя

$$S_{j_\lambda}^1 = \sum_{q=1}^4 \bar{x}_{Пq} \cdot w_{Пq, j_\lambda}^1, \quad j_\lambda = \overline{1, p_\lambda},$$

а на входы нейронов выходного слоя — взвешенные суммы сигналов с выходов нейронов 2-го (скрытого) слоя

$$S_{l_\lambda}^2 = \sum_{j_\lambda=1}^{p_\lambda} \bar{x}_{Пj_\lambda}^1 w_{Пj_\lambda, l_\lambda}^2, \quad l_\lambda = \overline{m_\lambda, n_\lambda}, \quad \lambda = \overline{1, 8},$$

где  $\bar{x}_{Пj_\lambda}^1 = (1 + \exp(\alpha S_{j_\lambda}^1))^{-1}$  — выход нейрона скрытого слоя;  $\alpha$  — коэффициент пологости сигмоиды,  $\alpha = 1$ ;  $q$  — порядковый номер нейрона входного слоя;  $j_\lambda, l_\lambda$  — порядковые номера нейронов соответственно скрытого и выходного слоя подсети с номером  $\lambda$ ,  $\lambda = \overline{1, 8}$ ;  $w_{Пq, j_\lambda}^1, w_{Пj_\lambda, l_\lambda}^2$  — весовые коэффициенты, связывающие нейроны входного слоя и скрытого слоя, а также скрытого и выходного слоя соответственно.

Выходные значения нейронной сети  $u_{Пl_\lambda}, l_\lambda = \overline{1, 80}$ , соответствующие включенным (выключенным) полусекциям в точка полосы  $i = \overline{1, N}$  вычисляются по формуле

$$u_{Пl_\lambda} = \text{int} \left[ (1 + \exp(\alpha S_{l_\lambda}^2))^{-1} \right],$$

где  $\text{int}$  — операция округления до 0 или 1.

Адекватность модели преобразователя обеспечивается путем уточнения вектора весовых коэффициентов  $w_{П}$  с помощью алгоритма обратного распространения [1, 2] и выбором числа нейронов в скрытом слое каждой подсети. Для оценки адекватности используются модульный критерии по всем выходам (обобщенный критерий)

$$J_{П} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{l=1}^{80} |u_{Пl}^*(i) - u_{Пl}(i)| \right) / \sum_{l=1}^{80} u_{Пl}^*(i) \quad (1)$$

и по выходам  $\lambda$ -ой подсети (частные критерии)

$$J_{II}^{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \sum_{l_{\lambda}=m_{\lambda}}^{n_{\lambda}} |u_{II l_{\lambda}}^*(i) - u_{II l_{\lambda}}(i)| / \sum_{l_{\lambda}=m_{\lambda}}^{n_{\lambda}} u_{II l_{\lambda}}^*(i) \right), \quad (2)$$
$$\lambda = \overline{1, 8}.$$

Модель преобразователя – модифицированная нейронная сеть (МНС) – считается адекватной, если критерии (1) и (2) удовлетворяют условиям

$$J_{II} \leq J_{II}^A \quad (3)$$

и

$$J_{II}^{\lambda} \leq J_{II}^A \quad (4)$$

где  $J_{II}^A$  — допустимое значение критериев, равное 0,05.

Проводилось несколько вычислительных экспериментов по данным стальной полосы типоразмера 5 (сталь 3СП,  $H = 4,7$  мм,  $T_{\text{кн}} = 777$  °С,  $V(0) = 339$  м/мин), сопровождающихся обучением МНС с различными значениями  $p_{\lambda}$ , по данным  $x_{II}^*$ ,  $\Pi^*(i)$ , характеризующим оптимальные режимы работы установки.

В первом и втором экспериментах после 1146 итераций алгоритма обратного распространения были найдены значения общего и частных критериев качества, позволившие определить подсети, нарушающие условие (4) и подлежащие уточнению.

В третьем эксперименте увеличили количество нейронов в скрытом слое первой и пятой подсети до значений  $p_1 = 9$  и  $p_5 = 8$  соответственно. После проведения обучения, завершившегося на 487 итерации, были получены удовлетворительные значения обобщенного (1) критерия качества  $J_{II} = 0,011$  и частных критериев (4), равных  $J_{II}^1 = 0,0374$ ;  $J_{II}^2 = 0,001$ ;  $J_{II}^3 = 0,001$ ;  $J_{II}^4 = 0,001$ ;  $J_{II}^5 = 0,0452$ ;  $J_{II}^6 = 0,001$ ;  $J_{II}^7 = 0,001$ ;  $J_{II}^8 = 0,001$ .

#### Список литературы

- 1 Уоссермен Р. Нейрокомпьютерная техника / Р. Уоссермен. М.: Мир, 1992. 240 с.
- 2 Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение / В.А. Головкин. М.: ИПРЖР. 2001. 256 с.

*Л.И. Курлапов*

*Казахский национальный университет им. Аль-Фараби*

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

### КЛАСТЕРНЫХ ГАЗОВ

Свойства газов определяются движением и взаимодействиями не только молекул, но и их стабильными или нестабильными образованиями. Удобный способ классификации таких образований основан на кластерной модели газов, в которой димеры, тримеры и кластеры, состоящие из большего числа молекул рассматриваются как самостоятельные субкомпоненты кластерной смеси [1–3]. Разработаны две схемы расчетов концентраций кластеров в газах в широкой области макропараметров. Особенность кластеров, заключающаяся в том, что их концентрации зависят от макропараметров, что приводит к изменению числа молей кластерной смеси. Расчеты равновесных свойств в виде фактора сжимаемости и теплоемкости хорошо согласуются со справочными данными. Применение кластерной модели к описанию процессов в неоднородных газах дает возможность не только дать физическую картину явлений, но и прогнозировать новые явления. Расчеты коэффициентов переноса и характеристик сопутствующих эффектов (бароэффекты, термоэффекты) плотных газов дают возможность предсказать новые эффекты, связанные с вкладом в эти эффекты процессов образования и/или распада кластеров (кластерной составляющей). Анализ резуль-

татов измерений и расчетов приводит к выводу о том, что при высоких давлениях и низких температурах в газе присутствуют мезоскопические частицы. В области их существования они приводят к заметным составляющим в теплофизических свойствах веществ, которые необходимо учитывать как в эксперименте, так и в теории.

### Список литературы

- 1 Курлапов Л.И. Физика кинетических явлений в газах: Монография / Л.И. Курлапов. Алматы, 2001. 271 с.
- 2 Курлапов Л.И. Кластерная модель газа / Л.И. Курлапов // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 2. С. 51 – 55.
- 3 Курлапов Л.И. Расчет свойств газов на основе кластерной модели / Л.И. Курлапов // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 23 – 29.

*С.Г. Шуклин, А.А. Дидик, Д.С. Шуклин*

Ижевский государственный технический университет

### ТЕПЛОФИЗИКА ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОСТРУКТУРЫ

В данной работе из органического полимера (поливинилового спирта) в присутствии неорганических солей переходных металлов карбонизацией при температурах менее 250 °С получены многостенные углеродные нанотрубки с внешним диаметром 20 ... 60 нм. На основании исследований полученных продуктов методами просвечивающей электронной микроскопии, электронной микродифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгенофазового анализа предлагается механизм роста наноструктур на зародышах неорганических продуктов синтеза. Рост трубок объясняется малым сродством к углероду некоторых металлов, соли которых применялись в синтезе, и, следовательно, слабым взаимодействием на границе раздела «неорганическая фаза/ продукт карбонизации». Исследования продукта методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что он состоит из металлоксидных наночастиц, покрытых углеродной оболочкой и многослойных углеродных нанотрубок, также заполненных металлоксидной фазой. Структура продукта, полученного в присутствии хлорида меди, показана на рис. 1.



Рис. 1

Изучалось влияние полученных углеродных металлосодержащих наноструктур (рис. 2) на теплофизические свойства пенококсов вспучивающихся составов на основе эпоксидной смолы ЭД-20, модифицированной полифосфатом аммония (ПФА, комп. 5). В сравнении с полученными результатами введение в композицию никельсодержащих наноструктур при соотношении ПФА и Ni-T 10:1 (комп. 4) приводит к увеличению углерод-углеродных и углерод-металлических группировок почти в три раза.

Увеличение содержания углеродных продуктов в пенококсе ведет к существенному изменению характера зависимости теплоемкости от температуры (рис. 2).

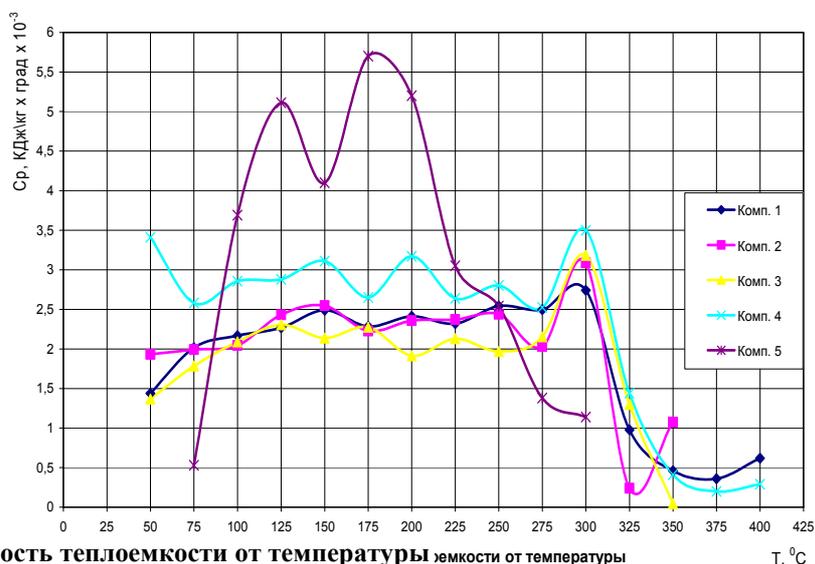


Рис. 2 Зависимость теплоемкости от температуры

Во-первых, теплоемкость композиций, модифицированных углеродными металлсодержащими наноструктурами (комп. 2 – содержит  $\text{C}_r$ , комп. 2 –  $\text{C}_r$  и борат кальция), которые являются структурообразователями получаемых пенококсов, в 3 – 7 раз выше теплоемкости композиции содержащей только полифосфат аммония, что объясняется разной степенью структурообразования композиций.

Во-вторых, теплоемкость композиции, содержащей ПФА, резко возрастает, в 10–11 раз, при температурах в области 373 ... 403 К и 430 ... 480 К, что обусловлено, по-видимому, выделением в образующиеся пузырьки паров воды и аммиака и ростом давления в пузырьках. В отличие от представленной картины в модифицированных композициях теплоемкость изменяется без значительных скачков, что обусловлено более спокойным течением процесса газообразования, а в случае введения в композицию бората кальция за счет образования сетки кальцийфосфобората, колебания теплоемкости практически незначительны. При этом можно отметить более существенные изменения теплоемкости (в 2–3 раза) при введении, наряду с боратом кальция, диоксида марганца (комп. 3). Это объясняется, на наш взгляд, конкурирующими процессами термодеструкции образцов, содержащих диоксид марганца, с образованием легколетучих воспламеняющихся продуктов. Степень вспучивания этой композиции составляет 16 р., а температура вспышки – 463 К.

Таким образом, на основании приведенных результатов можно утверждать, что борат кальция, а также углеродные металлсодержащие наноструктуры эффективны как структурообразователи при пенококсообразовании. Можно также предполагать, что введение углеродных металлсодержащих наноструктур оказывает влияние на изменение структуры стимулятора и газообразователя, наряду с влиянием на структуру отверждающего полимера, что способствует образованию пенококсов с повышенными теплофизическими характеристиками.

Стеновые доклады

К.З. Альжанов, А. Махумдолда

КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Е.А. БУКЕТОВА (КАЗАХСТАН)

ЗАВИСИМОСТЬ ДИФФУЗИОННОГО БАРОЭФФЕКТА  
ОТ ГЕОМЕТРИИ КАПИЛЛЯРА

Стационарно-проточным методом проведено исследование диффузионного бароэффекта бинарных смесей на круглых цилиндрических капиллярах и на плоскопараллельной щели в системах среднечисловой скорости и центра масс в широком интервале температур. Установлено, что величина диффузионного бароэффекта зависит от системы отсчета. В системе центра масс равен по величине бароэффекту в системе среднечисловой скорости, направлен от легкого компонента к тяжелому и обусловлено разностью истинных коэффициентов диффузии. Зависимость диффузионного бароэффекта от геометрии капилляра и температуры описывается степенным законом.

При исследовании диффузионного бароэффекта существенным является выбор «неподвижной» системы отсчета и характеристической скорости. На основе теории диффузии Л. Больцмана и термодинамики необратимых процессов Заслуженным деятелем науки Республики Казахстан доктором физико-математических наук, профессором Н.Д. Косовым выведены формулы диффузионного бароэффекта в системе среднечисловой скорости [1]

$$\Delta P^V = P^L - P^0 = \frac{8\bar{\eta}D_{12}}{r^2} \ln \frac{(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^L - \sqrt{m_2}}{(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^0 - \sqrt{m_2}}$$

и в системе центра масс

$$\Delta P^m = P^L - P^0 = \frac{8\bar{\eta}D_{12}}{r^2} \ln \frac{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^L \sqrt{m_2} [(m_2 - m_1)C_1^0 - m_2]]}{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^0 - \sqrt{m_2}] [(m_2 - m_1)C_1^L - m_2]}$$

где  $\bar{\eta}$  – усредненное по длине капилляра значение коэффициента вязкости смеси;  $r$  – радиус капилляра;  $D_{12}$  – коэффициент взаимной диффузии смеси;  $m_1, m_2$  – массы молекул диффундирующих газов;  $C_1^0, C_1^L$  – относительные концентрации первого компонента на концах капилляра.

Нами в работе [2] получены формулы диффузионного бароэффекта на плоско-параллельной щели в системе среднемассовой скорости, т.е. при  $v^m = 0$ :

$$\Delta P^m = P^L - P^0 = \frac{16\bar{\eta}D_{12}}{b^2 f(a/b)} \ln \frac{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^L \sqrt{m_2} [(m_2 - m_1)C_1^0 - m_2]]}{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^0 - \sqrt{m_2}] [(m_2 - m_1)C_1^L - m_2]}$$

Аналогично для случая  $J_1^n + J_2^n = 0, v^n = 0$  в системе среднечисловой скорости:

$$\Delta P^V = P^L - P^0 = \frac{16\eta D_{12}}{b^2 f(a/b)} \ln \frac{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^L - \sqrt{m_2}]}{[(\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})C_1^0 - \sqrt{m_2}]},$$

где  $f(a/b)$  – безразмерная функция, связанная с геометрией щели ( $a, b$  – ширина и высота плоскопараллельной щели), в нашем случае  $f(a/b) = 16/3$ .

В стационарно-проточном методе компенсирующий поток осуществляется путем наложения определенной разности давления на диффундирующие газы. Величина диффузионного бароэффекта зависит от величины как компенсирующего потока, так и гидродинамического сопротивления каналов, соединяющих сосуды с диффундирующими газами. Скорость гидродинамического компенсирующего потока, обусловленного диффузионным бароэффектом, обычно приравнивается к скорости пуазейлевого течения.

Измерение диффузионного бароэффекта проводились двумя наборами капилляров. Первый состоял из 277 капилляров, спаянных оловом, площадью  $0,658 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Для работы при повышенных температурах на серебряном припое ПСР-45 был собран второй набор, состоящий из 200 капилляров с площадью  $0,475 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Набор цилиндрических капилляров представляет трубки из нержавеющей стали (инъекционные иглы) внутренним диаметром  $0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и длиной  $75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Набор плоскопараллельных щелевых каналов образован отполированными стальными пластинами длиной 75 и шириной 34 мм; расстояние между пластинами 0,12 мм. Общая площадь шести одинаковых щелей  $0,245 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ . При повышенных температурах учитывалось линейное расширение капилляров.

Во избежание течи при нагревании щелевые трубопроводы и основание набора были изготовлены из стали одинаковой марки. Герметичность всей установки, включая диффузионную ячейку, проверялась перед каждым опытом. Размеры и форма трубопроводов выбирались такими, чтобы течение в них было безотрывным.

К концам набора капилляров через специальные патрубки присоединялась горизонтальная трубка с каплей маловязкого силиконового масла. Положение капли фиксировалось оптической трубкой двадцатикратного увеличения с точностью  $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$  м. опыты проводились на установке, имеющей следующие параметры: диаметр манометрической трубки  $2,78 \cdot 10^{-3}$  м, длина –  $90 \cdot 10^{-3}$  м, диаметр отверстия кранов –  $10^{-2}$  м, диаметр подводящих трубок –  $15 \cdot 10^{-3}$  м.

Контрольные измерения диффузионного бароэффекта проводились дифференциальным емкостным электронным микроманометром МБС-7, который подключался к прибору ИПЕ (измеритель приращения емкости). Регистратором получаемых разностей давления является ламповый электронный микровольтметр с ценой деления 0,006 мВ. Для исключения колебаний температуры мембраны микроманометра установлены в воздушном термостате.

В результате эксперимента установлено, что диффузионный бароэффект в системе центра масс по величине равен бароэффекту в системе среднечисловой скорости, направлен противоположно и удовлетворительно описывается кинетической теорией Л. Больцмана. Зависимость величины диффузионного бароэффекта от температуры и геометрии капилляра описывается степенным законом. Получены эмпирические формулы и методом наименьших квадратов определены значения константы степенной зависимости.

### *Список литературы*

1 Косов Н.Д. К определению коэффициента диффузии газов в различных системах отсчет / Н.Д. Косов // Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ-мат. 1970. № 6. С. 15 – 23.

2 Альжанов. К.З. Диффузионный бароэффект бинарных смесей на плоскопараллельной щели / К.З. Альжанов // Теплофизика и аэромеханика / ИТ и ИТПМ СО РАН. Новосибирск, 1998. Т. 5, № 3. С. 401 – 405.

*Л.Л. Антонова*

Тамбовский государственный технический университет

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ\***

Одними из важнейших характеристик керамических материалов являются их теплофизические свойства (ТФС). Особое значение при межоперационном теплофизическом контроле данных материалов приобретает уменьшение времени процесса измерения. Рассмотрим относительный метод неразрушающего контроля ТФС, при котором время действия теплового потока, идущего от нагревателя в плоскости  $z=0$  (рис. 1), ограничено до достаточно небольшого момента времени  $t_2$  по сравнению с известными методами, которые предполагают постоянное действие источника тепла ( $t_1 \gg 0$ ), т.е.  $t_2 \ll t_1$ .

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. А.А. Чурикова

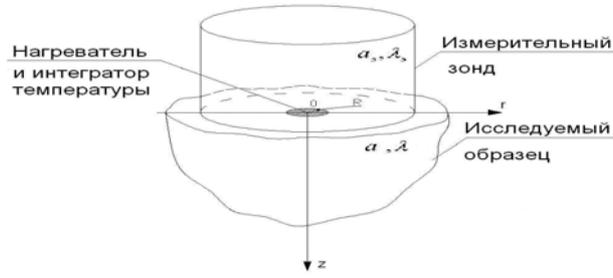


Рис. 1

Тогда краевая задача для двух соприкасающихся полуограниченных тел может быть записана в виде:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(t, r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(t, r, z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$(t > 0, 0 \leq r < \infty, 0 \leq z < +\infty);$$

$$\frac{1}{a_3} \frac{\partial U_3(t, r, z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U_3(t, r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_3(t, r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_3(t, r, z)}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$(t > 0, 0 \leq r < \infty, -\infty < z \leq 0);$$

$$U(0, r, z) = U_3(0, r, z) = 0; U(t, r, z) = 0, U_3(t, r, z) = 0 \text{ при } r, z \rightarrow \infty; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} -q_1(t, r) & \text{при } 0 \leq r \leq R, \\ 0 & \text{при } r > R; \end{cases} \quad q_1(t, r) = \begin{cases} q(t) & \text{при } t \leq t_2, \\ 0 & \text{при } t > t_2; \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial U_3(t, r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} q_2(t, r) & \text{при } 0 \leq r \leq R, \\ 0 & \text{при } r > R, \end{cases} \quad q_2(t, r) = \begin{cases} q_3(t) & \text{при } t \leq t_2, \\ 0 & \text{при } t > t_2; \end{cases} \quad (5)$$

$$\left( \lambda_3 \frac{\partial U_3(t, r, z)}{\partial z} - \lambda \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = \begin{cases} Q(t) & \text{при } t \leq t_2, \\ 0 & \text{при } t > t_2; \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial U(t, r, z)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial U_3(t, r, z)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (7)$$

Коэффициенты теплопроводности  $\lambda_3$  и температуропроводности  $a_3$  верхнего тела известны и постоянны. Из решения системы задачи (1) – (7), проводимого отдельно для исследуемого и сравниваемого тела в области временного интегрального преобразования Лапласа и пространственного интегрального преобразования Ханкеля, введя безразмерную переменную  $g(p) = \frac{pR^2}{a}$  и обозначив интеграл

$$\int_0^\infty \frac{I_1^2(\mu) d\mu}{\sqrt{\mu^2 + g(p)} \mu} = V(g(p)), \quad \mu = R\xi, \text{ для двух различных значений параметра интегрирования } p \text{ и } kp, (k > 1),$$

получим уравнение неразрушающего контроля параметра  $g(p)$ :

$$\frac{\frac{Q^*(p)(1 - e^{-t_2 p})}{U^*(p)} - \frac{\lambda_3}{2RV(g_3)}}{\frac{Q^*(kp)(1 - e^{-t_2 kp})}{kU^*(kp)} - \frac{\lambda_3}{2RV(kg_3)}} = \frac{V(g)}{V(kg)} \equiv \Phi(g, k).$$

Из зависимости  $\Phi = \Phi(g, k)$  при заданном фиксированном  $k$  определяется  $g$ , по численному значению которого находится коэффициент температуропроводности  $a = \frac{pR^2}{g}$ . Коэффициент теплопроводности материала находим из

$$\lambda = 2R \left( \frac{Q^*(p)(1 - e^{-t_2 p})}{U^*(p)} - \frac{\lambda_3}{2RV(g_3(p))} \right) V(g(p)).$$

*Л.Л. Антонова, А.А. Чуриков*

Тамбовский государственный технический университет

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Математические модели абсолютного и относительного методов неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств (теплопроводности и температуропроводности), предложенных нами ранее, для круглого и полосового нагревателей, предполагают постоянное действие источника теплового потока во время эксперимента. При этом плотность теплового потока, идущего от нагревателя в плоскости  $z=0$ , остается постоянной и равной  $q(t_1) = q = \text{const}$ , ( $t_1 \gg 0$ ), благодаря чему температура поверхности  $z=0$  в исследуемом образце в процессе нагрева достигает стационарного значения. В рассматриваемых методах используются интегральные характеристики температуры вида

$$S^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt_1} S(t_1) dt_1, \quad p > 0, \quad (1)$$

где  $S(t_1)$  – измеряемая температура;  $p$  – параметр преобразования Лапласа.

Для точного определения  $S^*(p)$  необходимо измерять температуру  $S(t_1)$  до момента времени  $t_1 \rightarrow \infty$ . Применение квадратурных формул Чебышева-Лагерра позволяло находить значение интеграла (1) с весьма высокой точностью по информации за достаточно короткий временной интервал (до 200 с). Но при этом постоянно действовал источник тепла, что влияло на нарушение условий полуограниченности образца и создавало необходимость постоянного контроля температуры и теплового потока. Поэтому не было возможным исследовать малые образцы, материалы с высокими значениями ТФС, выполнять действительно экспресс-измерения. Нами предлагается ограничить время действия теплового потока до достаточно небольшого момента времени  $t_2$ , ( $t_2 \ll t_1$ ). Что приводит к появлению в исходных краевых задачах методов дополнительного условия, а именно:

$$q_1(t, r) = \begin{cases} q(t) & \text{при } t \leq t_2, \\ 0 & \text{при } t > t_2. \end{cases}$$

Из решений таких краевых задач, полученных в области временного интегрального преобразования Лапласа и пространственного интегрального преобразования Ханкеля, найдена связь поверхностно-временной интегральной характеристики температуры нагреваемого круга или полосы поверхности исследуемого тела  $S^*(p)$  с поверхностно-временной интегральной характеристикой теплового потока  $q^*(p)$ . Например, при круглом нагреваемом участке

$$S^*(p) = \frac{2q^*(p)(1 - e^{-t_2 p})}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{1}{b\xi} I_1^2(R\xi) d\xi,$$

где  $p$  и  $\xi$  – параметры интегрирования Лапласа и Ханкеля соответственно;  $b = \sqrt{\xi^2 + \frac{p}{a}}$ ,  $I_1$  – функция Бесселя первого рода и первого порядка.

По известной методике для двух значений параметра интегрирования  $p$  и  $kp$ , ( $k > 1$ ), получены уравнения неразрушающего контроля коэффициента температуропроводности и теплопроводности. Отличие этих расчетных зависимостей от приведенных ранее состоит в появлении множителей вида  $(1 - e^{-t^2 p})$  и  $(1 - e^{-t^2 kp})$ . Они весьма просто могут быть рассчитаны, не усложняют математическую часть методов при решении многомерных задач теплопроводности, но при этом позволяют значительно сократить эксперимент, уменьшить объем информации, и при определении оптимального значения параметра  $p$  повысить точность расчета интегральных характеристик температуры и теплового потока.

*Б.А. Арутюнов, И.Г. Гоциридзе*

Московская государственная академия тонкой химической  
технологии им. М.В. Ломоносова

## ОБОБЩЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАЗНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФРЕОНОВ НА ЛИНИЯХ НАСЫЩЕНИЯ

В работе приводятся результаты исследования зависимости приведенной разности плотностей, поверхностного натяжения и давления для фреонов на пограничных линиях равновесия жидкость-пар. Выделение фреонов из существующих в настоящее время жидкостей связано с тем, что эти соединения исследованы достаточно полно и материалы по ним опубликованы в различных литературных источниках. Особенно важным является тот факт, что эти исследования относятся к интересующим нас свойствам веществ в широком интервале температур (давления), вплоть до критической точки для области фазового перехода жидкость-пар: плотности, давления и поверхностного натяжения. В предлагаемом исследовании предпринята попытка построить обобщенный метод обработки экспериментальных данных для указанных выше свойств.

Полученный ранее результат [1] показал, что существует единая обобщенная зависимость между разностью плотностей на пограничных линиях равновесия жидкость-пар от приведенного объема вида

$$\rho / \rho_k = f(\rho / \rho'). \quad (1)$$

В правой части уравнения (1) фигурирует обратная величина приведенной плотности (или приведенный объем). Такая форма обработки оказалась приемлемой только для плотности вещества, так как для фреонов существует достаточно много публикаций, приводящих параметры критической точки, которые чаще всего принимаются в качестве масштабов приведения. Учитывая трудности определения физических величин в критической точке, и так как некоторые параметры в ней равны нулю, были проведены поиски других масштабов приведения.

Как показал анализ кривой (1), на плоскости  $\rho$ - $T$  существует такая температура  $T^*$ , при которой  $\rho_k = \rho'$ . Отмечая особую роль плотности жидкости при исследовании свойств веществ, температура  $T^*$ , при которой  $\rho_k = \rho'$  была принята как базовая для нахождения масштабов приведения для других свойств. Такую обработку экспериментальных данных предлагается проводить для разности различных свойств на пограничных линиях равновесия в виде:

- для давления

$$P / P^* = f(\rho_k / \rho'), \quad (2)$$

- для поверхностного натяжения

$$\sigma / \sigma^* = f(\rho_k / \rho'). \quad (3)$$

Результаты обработки экспериментальных данных [2 – 5] в виде (1)–(3) показали, что наблюдается удовлетворительная сходимость экспериментальных данных как для давления, так и для поверхностного натяжения.

Процедура определения этой температуры следующая. По основной зависимости  $\rho$ - $T$ , которая аппроксимировалась в виде полинома, определялась температура в базовой точке  $T^*$ , в которой  $\rho_k = \rho'$ .

При определении масштабов приведения для других свойств на зависимостях  $P(T)$ ,  $\square(T)$  при  $T = T^*$  находились  $P^*$ ,  $\square^*$ .

Помимо зависимости (3) можно использовать

$$\square / \square^* = f(\square \square / \square \kappa). \quad (4)$$

Зависимости (3) и (4), по существу, приводят к одним и тем же результатам, но для дальнейшей аппроксимации и получения единого уравнения перспективнее использовать (4), так как отсчет здесь идет от нуля.

Стоит отметить, что аналогичные результаты по поверхностным натяжениям были получены Бачинским [6], который использовал другой характеристический масштаб.

### Список литературы

- 1 Арутюнов Б.А. Новые результаты исследования свойств веществ на линии насыщения жидкость-пар / Б.А. Арутюнов // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. IV Международной теплофизической школы / ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 53 – 55.
- 2 Богданов С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, Куприянова А.В. СПб.: СПбГАХИТ, 1999.
- 3 Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ / Н.Б. Варгафтик. М., 1972.
- 4 Машиностроение: Энциклопедия. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1–2. С. 208 – 283.
- 5 Перельштейн И.И. Термодинамические свойства фреона 12 и фреона 13 / И.И. Перельштейн. // Физические константы и свойства веществ. М., 1971. С. 80 – 84.
- 6 Филиппов Л.П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ / Л.П. Филиппов. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 13, 28.

*Б.А. Арутюнов, А.Б. Арутюнов, И.Ю. Скворцов*

Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова

## МЕТОД РАСЧЕТА ЭНТАЛЬПИИ НА ЛИНИЯХ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ И КОНДЕНСАЦИИ ПАРА БИНАРНЫХ И ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ

Предлагаемый метод определения теплоты парообразования бинарных и трехкомпонентных смесей основывается на полученных обобщенных зависимостях указанного свойства для чистых веществ [1]. Результаты обобщения вкратце можно описать следующим образом. Для фазового перехода жидкость-пар существует некоторая универсальная функция, имеющая вид

$$\Delta X / \Delta X^* = f(\rho_k / \rho'), \quad (1)$$

где  $\Delta X$ ,  $\Delta X^*$  – разность изучаемого свойства на пограничных линиях равновесия жидкости;  $\rho_k$ ,  $\rho'$  – критическая плотность и плотность на пограничной линии жидкости.

Приведенная зависимость дает хорошие совпадения для плотности, энтропии, поверхностного натяжения, вязкости, теплопроводности чистых веществ.

Используя обобщенную зависимость для энтропии

$$\Delta S / \Delta S^* = f(\rho_k / \rho') \quad (2)$$

для определения  $\Delta S$ , необходимо знать  $\Delta S^*$ ,  $\rho_k$ ,  $\rho'$ . Расчет  $\rho_k$  можно провести по вкладам функциональных групп исследуемого соединения [2]. Что касается  $\Delta S^*$ , то эта величина однозначно зависит от молекулярной массы  $M$  вещества [2].

Уравнение (2) на основании обработки экспериментальных данных можно представить в виде

$$\frac{\Delta S}{\Delta S^*} = -A + \frac{B}{\ln(\rho_k / \rho')}, \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  для индивидуальных веществ равны  $A = 0,473$ ,  $B = 0,665$ ; функция  $\Delta S_* = f(M)$  в явной форме имеет вид

$$\Delta S_* = \frac{12,307}{M^{0,92}}. \quad (4)$$

Полученные уравнения позволили рассчитать теплоту парообразования большинства чистых фреонов в зависимости от температуры. Для этого достаточно располагать химической формулой вещества и зависимостью  $\rho' = f(T)$ . Используя уравнения (3) и (4) были рассчитаны теплоты парообразования при различных температурах фреонов. Результаты расчета  $q$  по приведенной схеме показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений теплоты парообразования в широком интервале температур. Максимальное расхождение, в этой области температур, не превышает 5 %. Расхождения возникают при приближении к критической температуре. Причиной расхождения могут быть различные причины и, в первую очередь, большие погрешности в определении  $\rho_k$ ,  $\rho'$  и  $q$  вблизи критической точки. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить эти величины, взятые из различных литературных источников [1, 8].

Предполагаемый метод оказался применим к, по крайней мере, для двух и трех компонентных смесей. Уравнение (4) оказалось полностью пригодным. В то же время уравнение (3) сохраняет вид, но коэффициенты  $A$  и  $B$  становятся равными 0,3573 и 0,55 соответственно. Для применения уравнений (3) и (4) необходимо знать  $M_{см}$  и  $v_{к см}$  ( $\rho_{к см}$ ). Результаты расчета теплоты парообразования также показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Сравнение результатов показывает лучшее совпадение, чем для индивидуальных фреонов. Максимальное расхождение находится вблизи 5 %. Этот результат видимо связан с тем, что экспериментальные значения теплоты парообразования для смесей были определены при достаточно более низких температурах чем  $T_k$ .

**Обозначения:**  $\Delta S_{см}$  – изменение энтропии смеси при переходе жидкости в пар в изотермическом процессе, кДж/кг·К;  $T_{кип см}$  – температура кипения смеси, К;  $T_k$  – критическая температура, К;  $r$ ,  $r_{см}$  – теплоты парообразования чистого вещества и смеси веществ;  $\rho'_{см}$ ,  $\rho_{к см}$  – средняя плотность на линии жидкости при  $T_{кип}$  смеси и критическая плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $M$ ,  $M_{ср}$  – молекулярная масса чистого вещества и смеси веществ, кг/кмоль.

### Список литературы

- 1 Арутюнов Б.А. Новые результаты исследования свойств веществ на линии насыщения жидкость-пар / Б.А. Арутюнов // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. IV Международной теплофизической школы / ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 53 – 55.
- 2 Богданов С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, Куприянова А.В. СПб.: СПбГАХПТ, 1999.
- 3 Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ / Н.Б. Варгафтик. М., 1972.
- 4 Машиностроение: Энциклопедия. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1–2. С. 208 – 283.
- 5 Перельштейн И.И. Термодинамические свойства фреона 12 и фреона 13 / И.И. Перельштейн // Физические константы и свойства веществ. М., 1971. С. 80 – 84.
- 6 Филиппов Л.П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ / Л.П. Филиппов. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 13, 28.

**Б.А. Арутюнов, О.П. Губина**

Московская государственная академия тонкой химической  
технологии им. М.В. Ломоносова

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ НА ПОГРАНИЧНЫХ КРИВЫХ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКОСТЬ-ПАР

В данной работе предложена методика обобщенной обработки экспериментальных данных по термодинамическим свойствам различных веществ на пограничных линиях равновесия жидкость-пар. Обработка экспериментальных данных проводилась в виде

$$\Delta\rho/\rho_k = f(\rho_k/\rho'). \quad (1)$$

Результаты обработки существующего банка экспериментальных данных зависимости (1) привели к единой кривой для всех существующих жидкостей с удовлетворительной точностью.

Наличие универсальной зависимости позволило в аналогичной форме (1) провести обобщение и для других термодинамических свойств веществ ( $\Delta S$ ,  $r$ ).

Поскольку возникают определенные трудности с выбором масштаба приведения для этих свойств в критической точке ( $\Delta S = 0$ ,  $r = 0$ ), на кривой в качестве базовой точки была выбрана точка, в которой  $\Delta\rho = \rho_k$ . Значения  $\Delta S$ ,  $r$  в базовой точке были приняты в качестве масштабов приведения. Таким образом, обработка для  $\Delta S$ ,  $r$  можно проводить в виде:

$$\Delta S / \Delta S_{\Delta\rho=\rho_k} = f_s(\rho_k / \rho'); \quad (2)$$

$$r / r_{\Delta\rho=\rho_k} = f_r(\rho_k / \rho'). \quad (3)$$

Алгоритм нахождения масштабов приведения в базовых точках следующий. По зависимостям  $\Delta\rho \sim T$  (или  $\rho' \sim T$ ) находятся температуры  $T^*$  в базовой точке, а затем по зависимостям  $\Delta S \sim T$ ,  $r \sim T$  при  $T^*$  находятся значения  $\Delta S^*$ ,  $r^*$ . При определении  $T^*$ ,  $\Delta S^*$ ,  $r^*$  соответствующие зависимости аппроксимировались в виде полинома.

Приведенная обработка в виде (2), (3) показала, что имеет место хорошая сходимость экспериментальных данных [3] для разности энтропии, представленной в виде (2), а для теплоты парообразования наблюдается расслоение кривых, построенных по зависимости (3).

Расслоение кривых (3) может быть связано с наличием приведенной температуры в составе выражения для температуры парообразования. Необходимо отметить, что базовая точка соответствует значению приведенной температуры  $\tau = 0,98$ , т.е. находится в околоскритической области. Температура в этой точке на 5 ... 15 ° ниже критической, если речь идет о газах, органических и неорганических жидкостях.

Наличие универсальной зависимости (1) показывает, что в качестве масштабов приведения могут быть выбраны любые точки на этой кривой.

Таким образом, было принято решение определять значения теплот парообразования веществ на линиях насыщения, используя зависимость (2), имеющую хорошую сходимость. В этом случае интересной представляется зависимость изменения энтропии в базовых точках от молекулярной массы вещества.

Последовательность определения теплоты парообразования вещества следующая. По известной зависимости через известную молекулярную массу вещества находят  $\Delta S^*$ . Для численных расчетов была предложена аппроксимация

$$\Delta S^* = 12,307/M^{0,92} \quad (4)$$

По зависимости на через известный масштаб  $\rho_k/\rho'$  находят  $\Delta S / \Delta S_{\Delta\rho=\rho_k}$ . В этом случае пользуются аппроксимацией

$$\Delta S_{\Delta\rho=\rho_k} = -1/(0,437+0,652/\ln(\rho_k/\rho')). \quad (5)$$

Найденную из выражений (4), (5) разность  $\Delta S$  умножают на соответствующую температуру.

Предложенный метод нахождения теплоты парообразования позволяет существенно сократить объем экспериментального материала и имеет достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Обозначения:  $T$  – температура, К;  $V$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho$  – плотность, кг/ м<sup>3</sup>;  $S$  – энтропия, кДж/кг;  $r$  – теплота парообразования, кДж/кг;  $\phi = V/V_k = \rho_k/\rho'$  – приведенный объем;  $\Delta$  – разность соответствующих параметров на пограничных кривых равновесия.

Индексы: ' – параметры на линии кипящей жидкости; " – параметры на линии сухого насыщенного пара; к- критическое состояние; \* – базовое значение разности свойств вещества при переходе от состояния кипящей жидкости в состояние сухого насыщенного пара, когда  $\Delta\rho/\rho_k = 1$ .

### Список литературы

- 1 Арутюнов Б.А. // Всероссийская научная конференция по тепло- и массообмену в химической технологии: Тезисы докладов / Б.А. Арутюнов, Б. Бланк. Казань, 2000. С. 54, 55.
- 2 Арутюнов Б.А. Новые результаты исследования свойств веществ на линии насыщения жидкость-пар / Б.А. Арутюнов // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. IV Международной теплофизической школе / ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 53 – 55.
- 3 Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ / Н.Б. Варгафтик. М., 1972.
- 4 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Гарзиманов, Е.Е. Тоцкий. М.: Энергоиздат, 1990. С. 352.
- 5 Машиностроение: Энциклопедия. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1–2. С. 208 – 283.

**И.В. Баранов, С.С. Прошкин, В.А. Самолетов**

Санкт-Петербургский Государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

### ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И РАЗМОРАЖИВАНИЯ

Измерения теплофизических характеристик (ТФХ) различных влагосодержащих материалов проводятся много десятилетий, но проблема по-прежнему остается актуальной. При проведении холодильных процессов ТФХ веществ, содержащих влагу, испытывают значительные количественные и качественные изменения. Это связано с фазовыми переходами, которые в этих веществах протекают сложнее, чем в чистой воде.

За многие годы проведения экспериментов по определению ТФХ влагосодержащих веществ создано значительное число установок и методов. При измерении равновесных характеристик наибольшее распространение получили методы: смешения, импульсного и непрерывного адиабатного нагрева. В тоже время широко известные методы регулярного и монотонного режима, разрабатываемые школой Г.М. Кондратьева, при измерениях в температурной области фазовых превращений практически не использовались, так как нуждались в дополнительном теоретическом обобщении. Хотя именно эти методы позволяют получать весь комплекс ТФХ с достаточной степенью точности. Под руководством Е.С. Платунова более десяти лет на кафедре физики СПбГУНиПТ ведутся работы по созданию методов и устройств, предназначенных для комплексного изучения ТФХ различных материалов в условиях замораживания и размораживания. Одним из достоинств, вновь создаваемых теплофизических приборов, является автоматизация процесса проведения опыта и обработки экспериментальной информации с помощью специализированных электронно-вычислительных устройств (контроллеров). Благодаря применению специализированных контроллеров появилась возможность использовать теоретические основы динамических методов для исследований кинетики тепловых процессов, которые происходят в структурно сложных многокомпонентных веществах при изменении их температуры.

На основе метода регулярного монотонного режима, обобщенного на случай сугубо нелинейных ТФХ материалов был разработан метод и на его основе создана аппаратура для комплексного измерения равновесных ТФХ веществ в области агрегатных, структурных и химических превращений. В состав установки входят: микрокалориметр свободного нагрева (охлаждения) для исследования кинетики фазовых превращений, энтальпии  $h(t)$ , эффективной  $c_{эф}(t)$  и истинной  $c(t)$  теплоемкостей; специальное электронно-вычислительное устройство (контроллер), с помощью которого автоматизирована процеду-

ра проведения опыта; морозильная камера, которая обеспечивает термостатирование в диапазоне от температуры окружающей среды до минус 30 °С, с точностью до 1°С. Данная аппаратура рассчитана на измерения, как в условиях монотонного нагрева, так и охлаждения в диапазоне температур от минус 30 до 70 °С.

В условиях принудительного охлаждения и нагрева влагосодержащих веществ, когда захватывается область температур кристаллизации, проявляются интенсивные обратимые тепловые эффекты фазовых превращений связанной влаги. Они действуют внутри образцов как объемные тепловые источники или стоки, интенсивность которых в нестационарных условиях оказывается сложной функцией температуры. Внешне они проявляются как резко изменяющаяся с температурой добавка к истинной теплоемкости основных компонентов продукта. Эти внутренние тепловые источники и стоки непосредственно влияют на энтальпию, температурное поле и, как следствие, на тепловой режим обработки продукта на всех этапах его охлаждения и нагрева.

С учетом сказанного, нестационарное уравнение теплопроводности для пищевых продуктов в области кристаллизации связанной воды приобретает сугубо нелинейный вид [1]

$$\operatorname{div}[\lambda(t) \operatorname{grad} t] = [c(t) + w(t)] \rho \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $t = t(x, y, z, \tau)$  – температурное поле образца;  $\lambda(t)$  – коэффициент теплопроводности;  $c(t)$  – удельная теплоемкость однофазных компонентов продукта;  $w(t) = dh_{\text{фп}}(t)/dt$  – температурная производная удельной энтальпии  $h_{\text{фп}}(t)$  фазовых превращений в продукте. Она характеризует плотность температурного распределения интегральной удельной теплоты плавления  $q_{\text{пл}}$  находящейся в продукте воды и функционально связана с  $q_{\text{пл}}$  соотношением

$$q_{\text{пл}} = \int w(t) dt, \quad (2)$$

если интегрирование осуществляется по всей температурной области кристаллизации связанной воды. Заметим, что в работе [2] величина  $w(t)$  названа теплотой фазового перехода, хотя имеет размерность удельной теплоемкости. В связи с этим, чтобы избежать в дальнейшем терминологических недоразумений, условимся называть ее дифференциальной теплотой плавления, чтобы не путать с интегральной теплотой плавления и удельной теплоемкостью.

Проинтегрируем уравнение (1) по всему объему  $V$  исследуемого образца. После интегрирования левая часть уравнения, в соответствии с теоремой Гаусса – Остроградского, определяет полный тепловой поток  $Q(\tau)$ , который поступает к образцу извне через наружную поверхность. Следовательно, вместо уравнения (1) появляется возможность записать уравнение теплового баланса образца с внешним тепловым источником

$$Q(\tau) = \int_V (c + w) \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV. \quad (3)$$

Уравнение (3) существенно упрощается, если образец однороден, а опыт проводится в условиях, при которых температурное поле образца сохраняется равномерным во всем его объеме. В этом случае подынтегральная функция, становясь однозначной функцией температуры, перестает зависеть от координат (объема) и уравнение (3) приобретает вид

$$Q(\tau) = [c(t) + w(t)] \rho V \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Это уравнение служит теоретической основой предлагаемого способа исследования тепловых и влажностных характеристик пищевых продуктов в широкой области температур, включая область кристаллизации связанной влаги.

Предварительный анализ показал, что при различных режимах замораживания или оттаивания продуктов допустимая неравномерность температурного поля не должна превышать нескольких долей кельвина. Практически это означает, что измерения должны производиться на образцах малых размеров, так как только в этих условиях удастся значительно интенсифицировать внешние тепловые воздействия на образец и снижать длительность опыта до 20 ... 30 минут, сохраняя достаточно равномерное температурное поле внутри образца. Исследования пищевых продуктов (мясо, молоко, картофель и др.) [3] показали, что при такой длительности опыта влиянием тепловых эффектов, обусловленных химическими и структурными превращениями в образце, можно пренебречь, а определяющими становятся те-

пловые эффекты фазовых превращений связанной воды, являющиеся однозначными функциями температуры. Благодаря этому для характеристики тепловых свойств пищевых продуктов в области кристаллизации часто ограничиваются понятием эффективной теплоемкости  $c_{эф}(t)=c(t)+w(t)$ . Однако, наряду с нею в предлагаемом способе рассмотрена возможность выделения из  $c_{эф}(t)$  обеих ее составляющих: истинной удельной теплоемкости исходных компонентов продукта  $c(t)$  и дифференциальной теплоты плавления связанной воды  $w(t)$ . Это позволило существенно расширить круг измеряемых в опыте характеристик.

На основе экспериментальной информация о температурной зависимости исследуемого образца имеется возможность определить: 1) энтальпию  $h(t)$  материала; 2) эффективную теплоемкость  $c_{эф}(t)$ ; 3) криоскопическую температуру  $t_{кр}$ ; 4) интегральную теплоту плавления  $q_{пл}$ ; 5) энтальпию фазовых превращений связанной воды  $h_{фп}(t)$ ; 6) дифференциальную теплоту плавления  $w(t)$  связанной воды; 7) исходное влагосодержание продукта  $u_{исх}$ ; 8) влагосодержание  $u(t)$  на различных уровнях температуры в области кристаллизации связанной воды; 9) долю невывороженной воды  $W_{нв}(t)$  на различных уровнях температуры.

Таким образом, используя небольшие количества влагосодержащего, с помощью рассмотренного метода и устройства возможно определить за 20-30 минут целый комплекс тепловых характеристик.

Следует отметить, что используемые в настоящей работе приемы решения нелинейных задач теплопроводности позволяют разработать методы и устройства, предназначенные для определения переносных ТФХ влагосодержащих материалов.

Полученные теоретические и практические результаты настоящей работы могут быть полезными: для определения удельной теплоемкости и энтальпии тонкодисперсных влагосодержащих материалов в условиях их замораживания и размораживания; при проектировании аналогичных теплоизмерительных установок для изучения тепловых и влажностных свойств влагосодержащих материалов; при автоматизации теплофизических приборов и установок.

#### Список литературы

- 1 Теплофизические измерения и приборы /Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Петров Г.С; Под общ. ред. Е.С. Платунова. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 256 с.
- 2 Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов / Под ред. А.С. Гинзбурга. М.: Пищевая промышленность, 1975. 223 с.
- 3 Баранов И.В. К вопросу измерений кинетики фазовых превращений в пищевых продуктах / И.В. Баранов, Е.С. Платунов, В.А. Самолетов // Проблемы теплофизики и теплообмена в холодильной технике: Межвуз. сб. науч. тр. / СПбГАХПТ. СПб., 1994. С. 28 – 32.
- 4 Баранов И.В. Измерение теплофизических характеристик веществ и материалов в области агрегатных, химических и структурных превращений / И.В. Баранов, С.С. Прошкин // Вестник Международной Академии холода / СПбГАХПТ. СПб., 2003. № 4. С. 31 – 34.

*М.П. Беляев, А.Р. Соколов*

Тамбовский государственный технический университет

### ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДОРОЖНОГО БИТУМА ОТХОДАМИ ПОЛИМЕРНОЙ ТАРЫ И УПАКОВКИ

В настоящее время одной из главных проблем в России является состояние автомобильных дорог. Образующиеся ямы, трещины, выбоины приводят к повышению аварийности и понижают срок службы автомобилей.

Одной из основных причин снижения долговечности дорожного покрытия является низкое качество дорожного битума. Проведенные исследования используемых битумов показывают, что их качественные показатели часто не удовлетворяют требованиям ГОСТ 22245–90. С целью получения качественного дорожного покрытия проведено исследование влияния различных модификаторов на свойства битума. Рассмотрена возможность модификации дорожных битумов отходами полимерной тары и упаковки,

имеющими тенденцию к лавинообразному увеличению, в связи с постепенным приближением России по уровню потребления упаковки к развитым странам.

Разработаны лабораторные установки на основе турбинного смесителя и Z-образного смесителя периодического действия, позволяющие проводить исследования модификации дорожного битума отходами полимерной тары и упаковки, варьируя температурными и скоростными режимами, концентрацией полимерного материала, а также исследуя эффект от совмещения различных модификаторов.

Полученные результаты показывают: полимерные отходы улучшают такие показатели, как эластичность, упругость, растяжимость, температуру плавления и хрупкости исходного битума, что приводит к существенному улучшению качества дорожного покрытия.

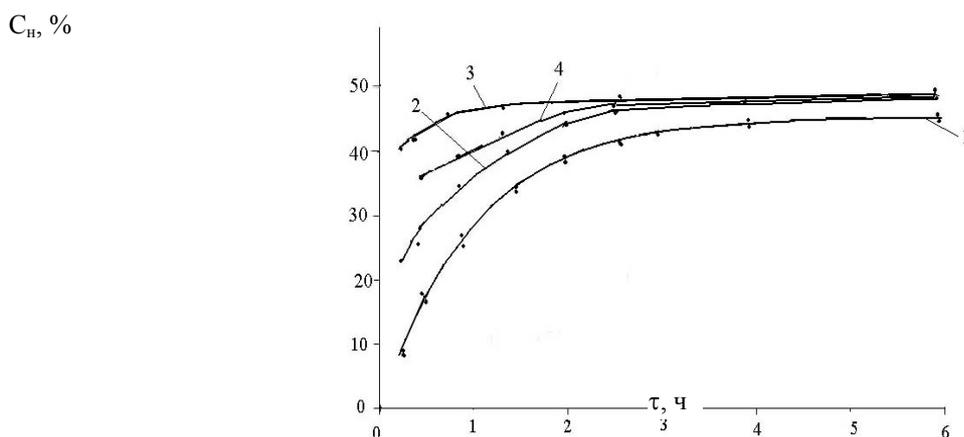
*М.В. Забавников, П.С. Беляев, О.Г. Маликов*

Тамбовский государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАБУХАНИЯ И ДЕСТРУКЦИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ НЕФТЯНЫХ БИТУМОВ

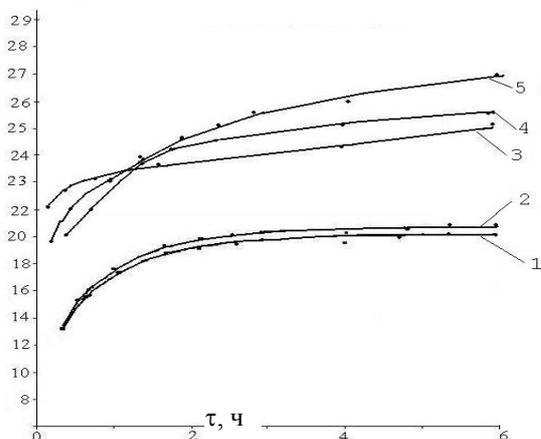
Одним из направлений повышения качества нефтяных битумов является их модификация отходами резинотехнических изделий. Самыми крупнотоннажными из них являются изношенные шины, при утилизации которых получают резиновую крошку.

В процессе приготовления резинобитумного вяжущего резиновая крошка смешивается с битумом, который является рабочей средой, при контакте с которой, а точнее с легкими масляными фракциями битума, протекают два процесса: набухание, сопровождающееся увеличением массы резины, и вымывание из резины растворимых в среде ингредиентов с уменьшением ее массы. Одновременно с процессом набухания идет процесс термодеструкции резины в среде битума. Степень и скорость этих процессов определяется температурой и продолжительностью процесса смешения. Температура течения процесса ограничивается максимальной температурой переработки битума, которая для дорожного битума составляет 433 К. Действие более высоких температур в течение длительного времени приводит к необратимой деградации битума. При исследовании этих процессов в лопастном смесителе периодического действия были получены зависимости степени набухания  $C_n$  и степени деструкции  $C_d$  от времени смешения  $\tau$  (рис. 1 и рис. 2).



**Рис. 1** Зависимость степени набухания резиновой крошки в битуме БНД 60/90 от времени смешения, скорости вращения лопастей смесителя и фракции резиновой крошки:

1 –  $\varnothing$  0,8 ... 1 мм и  $\varnothing$  0,6 ... 0,8 мм при 100 об/мин; 2 –  $\varnothing$  0,8 ... 1 мм, 3 –  $\varnothing$  1 ... 2 мм; 4 –  $\varnothing$  0,6 ... 0,8 мм при 200 об/мин.

$C_d, \%$ 

**Рис. 2** Зависимость степени деструкции резиновой крошки в битуме БНД 60/90 от времени смешения, скорости вращения лопастей смесителя и фракции резиновой крошки:

1 – Ø 0,8 ... 1 мм; 2 – Ø 0,6 ... 0,8 мм при 100 об/мин; 3 – Ø 0,8 ... 1 мм, 4 – Ø 0,6 ... 0,8 мм; 5 – Ø 1 ... 2 мм при 200 об/мин.

Из анализа кинетических кривых видно, что наиболее интенсивно процессы набухания и деструкции резиновой крошки в битуме протекают в первые 2,5 часа смешения и увеличение скорости вращения рабочих органов в 2 раза приводит к интенсификации этих процессов и росту степени набухания  $C_n$  и степени деструкции  $C_d$ .

*М.Д. Иванов, Н.П. Докучаев, И.В. Ильин*

НПП «Агроприбор» (Липецк)

### УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЛИНЕЙКА ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

На сегодняшний день на рынке существует множество приборов, позволяющих контролировать и регулировать различные параметры. В основном все они могут контролировать и регулировать достаточно большое число параметров, но эта универсальность значительно повышает их стоимость на рынке и требует высококвалифицированных специалистов по их обслуживанию. С целью обеспечения доступности таких приборов большому количеству пользователей научно-производственное предприятие «Агроприбор» (Липецк) разработало ряд приборов контроля и регулирования технологических параметров в сельскохозяйственном производстве. Ряд этих приборов выполнена по единой архитектуре, и состоит из следующих приборов:

- регулятор-измеритель температуры и влажности воздуха РТВ-01;
- программируемый регулятор измеритель температуры и влажности ПРТВ-04;
- программируемый регулятор измеритель температуры и влажности ПРТВ-08;
- программируемый регулятор универсальный ПРУ-04.

#### 1 Технические характеристики РТВ-01

Параметры	Размерность	Значение
Диапазон измерения:		
– температуры	°C	-25° ...
– влажности	%	+125° 0 ... 99

Количество каналов измерения:		
– температуры		1
– влажности		1
Количество каналов управления:		
– температуры		1
Разрешающая способность:		
– температуры	°C	1
– влажности	%	1
Погрешность измерения:		
– температуры	°C	± 0,5°
– влажности	%	± 2
Время измерения	с	не более 1
Максимальная мощность нагрузки на канал	кВт	1,0
Количество разрядов индикации		4
Напряжение питания	В	220±10%
Потребляемая мощность	Вт	5,0
Условия эксплуатации:		
– температура окружающей среды	°C	-20 ... +80
– относительная влажность	%	30 ... 80
Размеры	мм	90×140×100

Регулятор-измеритель температуры и влажности РТВ-01, имеет характеристики приведенные в табл. 1. Прибор позволяет регулировать температуру и измерять влажность. Канал регулирования температуры имеет жестко заданное значение температуры, определяемое технологией.

Характеристики программируемого регулятора ПРТВ-04 приведены в табл. 2. Прибор позволяет регистрировать и регулировать температуру и влажность одновременно на четырех объектах, программировать режимы на удаленном компьютере по интерфейсу RS-232 или RS-485 (по отдельному заказу), т.е. работать в составе компьютерной сети. Прибор может быть запрограммирован по техническим требованиям заказчика.

## 2 Технические характеристики ПРТВ-04

Параметры	Размерность	Значение
Диапазон измерения:		
– температуры	°C	-25° ...
– влажности	%	+125° 0 ... 99
Количество каналов измерения:		
– температуры		5
– влажности		5
Количество каналов управления:		
– температуры		4
– влажности		4
Разрешающая способность:		
– температуры	°C	1
– влажности	%	1
Погрешность измерения:		
– температуры	°C	± 0,5°
– влажности	%	± 2

Время измерения	с	не более 1
Максимальная мощность нагрузки на канал	кВт	1,0
Количество разрядов индикации		4
Напряжение питания	В	220±10%
Потребляемая мощность	Вт	5,0
Условия эксплуатации:		
– температура окр. среды	°С	-20...+80
– относительная влажность	%	30...80
Размеры	мм	185×140×100

Программируемый регулятор температуры и влажности ПРТВ-08 имеет следующие отличия от ПРТВ-04:

- расширение числа каналов измерения по температуре и влажности до 8;
- расширение числа выходов регулирования до 16;
- увеличение разрешающей способности по температуре до 0,1 °С.

Программируемый регулятор универсальный ПРУ-04, отличительными особенностями которого по сравнению с ПРТВ-08 являются:

- каналы измерения рассматриваются как обычные цифровые (температура) и аналоговые (влажность, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>);
- на панель индикации вынесено 4 контролируемых параметра (например температура, влажность, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).

Разработанный на сегодняшний день ряд приборов контроля и регулирования технологических параметров является достаточно доступным для пользователей благодаря широкому выбору типа прибора под конкретную задачу и сравнительно невысокой стоимости. Приборы комплектуются датчиками температуры фирмы Dallas Semiconductors (США) и влажности фирмы Honeywell (США). Приборы являются простыми в управлении и обслуживании. Приборы конструктивно выполнены в пластиковых корпусах со степенью защиты IP40, со сверхконтрастной индикацией.

Область применения: поддержание микроклимата и управление технологическими процессами в овощехранилищах, теплицах, животноводческих помещений, сушильных камерах, системах управления микроклиматом в жилых помещениях и т.п.

*А.А. Карнов*

Воронежская государственная лесотехническая академия

## **ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПЕРИОДИЧЕСКИ КОНТАКТИРУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Теплообмен на границе раздела двух контактирующих тел является объектом многочисленных исследований. Особый интерес вызывает практически неизученный раздел для соединений с периодически соприкасающимися поверхностями. Такой вид теплообмена имеет место в соединениях установок для скоростного определения теплофизических характеристик материалов, седло клапана-гнездо в головке блока двигателей внутреннего сгорания, заготовка и пуансон при обработке металлов давлением, паяльник-заготовка.

Решение задачи теплопереноса через такие соединения может быть реализовано в простейшей постановке, если рассматривать одномерный перенос тепла вдоль двух идентичных стержней, оси которых находятся на одной прямой. Принимаем, что неконтактирующие концы стержней выдерживаются при разных фиксированных температурах, два других конца приводятся периодически с постоянным циклом в контакт.

Поскольку точное решение трехмерного уравнения теплопроводности практически невозможно ввиду сложной геометрической формы поверхностей контакта и многочисленных граничных условий используем одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – время.

При этом считаем, что во время контакта термосопротивление сосредоточено в тонкой пленке, сопротивление которой равняется контактному термосопротивлению в условиях стационарности. Ввиду идентичности материала стержней процесс рассматривается только в более нагретом стержне. Примем за начальное положение конец более нагретого стержня, где поддерживается постоянная температура  $T_1$ , температуру в средней точке пленки равной нулю, длину стержня  $l$  и половину контактного термосопротивления эквивалентным тепловому сопротивлению участка стержня  $\epsilon$ . Тогда граничные условия примут вид:

- для  $x = 0$   $T = T_1$  при всех  $\tau$ ;
- 
- для  $x = l$  при контакте ( $0 < \tau < \tau_k$ )

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{T}{\epsilon}; \quad (3)$$

- для  $x = l$ , когда поверхности выведены из контакта  $\tau_k < \tau < (\tau_0 + \tau_k)$

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\tau_k$  – время в течение одного цикла при контакте поверхностей;  $\tau_0$  – время в течение одного цикла, когда поверхности выведены из контакта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стержня.

Для решения уравнения теплопроводности (1) с принятыми граничными условиями (2) – (4) может быть применено приближение в конечных разностях.

С другой стороны, практически более рациональным представляется решение с использованием размерного анализа.

В данном случае установленное критериальное уравнение включает три безразмерных параметра: длительность контакта на каждый цикл  $\nu \tau_k$  ( $\nu$  – частота), термосопротивление

вследствие периодического прерывания процесса теплообмена  $\frac{\nu l_2^2}{a}$  и контактное термосопротивление

$\frac{\nu l_3^2}{a}$  ( $l_2$  – мнимый участок стержня, эквивалентный половине контактного термосопротивления и  $l_3$  – мнимый участок стержня, адекватный сопротивлению вследствие периодического прерывания теплового потока).

**А.М. Климов, Ю.А. Тепляков, Т.А. Максименкова**

Тамбовский государственный технический университет

## МОДЕЛИ АНОМАЛЬНОГО МАССОПЕРЕНОСА

### В ПОЛИМЕРАХ

Опыт исследований процессов массопереноса, сопровождается аномалиями, позволяет выделить основные математические модели, описывающие кинетику переноса в твердых телах: по предыстории, по напряженному состоянию, микрогетерогенности системы твердое тело–удаляемая фаза, по изменению поверхностной концентрации во времени.

Модель по предыстории предполагает, что величина коэффициента массопереноса зависит от предыстории распределения концентрации распределенного вещества в твердом теле.

Математическая модель массопереноса, отражающая влияние внутренних напряжений, учитывает изменение градиента химического потенциала и напряженное состояние твердого вещества в зависимости от парциального давления мигрирующего вещества.

Модель гетероциклической системы предполагает, что твердое тело состоит из двух фаз, в которых массоперенос осуществляется в две стадии с существенно различными скоростями.

Считают, что главным критерием массопереноса, подчиняющегося закону Фика, служит быстрое достижение равновесного значения поверхностной концентрации мигрирующего вещества при изменении парциального давления в твердой фазе и ее постоянства в процессе последующей миграции.

В коллоидных системах и стеклообразных полимерах приближение к равновесному значению концентрации мигрирующего вещества происходит медленно из-за малой подвижности скелетообразующих структур твердого вещества.

Для таких структур предложено наиболее универсальное уравнение изменения поверхностной концентрации, применение которого в качестве граничного условия для уравнения Фика, дает семейство кинетических кривых, хорошо согласующихся с экспериментальными кривыми, полученными для ряда аномальных систем.

В последнее время разработана математическая модель массопереноса, основанная на предположениях, учитывающих аномалии в процессе массопереноса в полимере с изменяемой структурой, учитывающая изменение коэффициента массопереноса по координате и медленное установление поверхностной равновесной концентрации.

Уравнение массопроводности в последнем случае принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \alpha(x) K(c, T) \frac{\partial c}{\partial x} \right],$$

где  $\alpha(x)$  – структурная функция, учитывающая перестройку структуры в ходе процесса и влиянии изменения структуры на коэффициент массопроводности;  $K$  – коэффициент массопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

*О.Н. Кожухина, В.П. Ярцев*

Тамбовский государственный технический университет

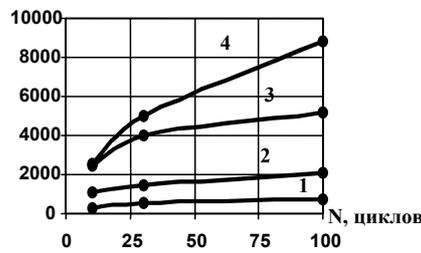
## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ТРУБ**

В процессе эксплуатации трубы канализационных систем подвергаются воздействию достаточно агрессивных стоков, что снижает сроки эксплуатации труб. Поэтому необходимо исследовать влияние различных факторов на износ материала труб, а также закономерности разрушения асбестоцемента при длительном нагружении в режиме заданных постоянных напряжений и температур.

Трубы канализационных систем заполняются периодически, поэтому было проведено испытание на износ после 10,30 и 100 циклов замачивания образцов в воде. Изучение закономерностей износа асбестоцемента проводили на дисковой машине МИ-2. Для создания процесса истирания в качестве контртела использовали гладкую сталь, металлическую сетку и шлифовальную шкурку.

Образцы вырезали из стенок трубы в виде кубиков размерами  $10 \times 10 \times 15$  мм. При изучении влияния жидкости на интенсивность износа асбестоцемента образцы выдерживали различное время в воде. Испытания проводили одновременно на двух образцах при различных давлениях прижима и температуре. Температуру создавали с помощью специальной криотермокамеры, в которую вмонтирован испытательный блок. В процессе испытания, с помощью специальных тонких хромель-копелевых термопар диаметром 0,1 мм, вмонтированных в образец температуру замеряли с точностью до  $1^\circ\text{C}$ . В процессе испытаний фиксировали величину разогрева, которая составила менее 3 % от градиента температур испытания. Малая скорость (0,3 м/с) и малые давления прижима (не более  $2 \text{ кг/см}^2$ ) не вызывали большего разогрева поверхности.

Скорость износа  $J$  рассчитывали по формуле  $J = \Delta m / t$ , где  $\Delta m$  – потеря массы образца в результате истирания;  $t$  – время истирания.



**Рис. 1 Влияние количества циклов замачивания на скорость износа образцов при 30 °C (1), (3) и при 90 °C (2), (4) вырезанных вдоль тела асбестоцементной трубы**  
(1), (2) – 1,0 кг/см<sup>2</sup>; (3), (4) – 2,0 кг/см<sup>2</sup>

На рис. 1 показаны закономерности скорости износа от количества циклов замачивания при различных контактных давлениях, откуда видно, что скорость износа асбестоцементных труб с увеличением температуры и количества циклов замачивания возрастает. Зависимость скорости износа от количества циклов замачивания при 10 циклах минимальна, при 30 циклах увеличивается в 1,2 раза; при 100 циклах – в 2 раза. При повышении температуры скорость износа возрастает в зависимости от контактного давления в 4–5 раз, что приводит к катастрофическому характеру разрушения асбестоцементной трубы. Температурная зависимость скорости износа увеличивается при максимальной температуре 90 °C в 1,6 раза. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо избегать высоких температур в сточных водах.

*М.А. Кузнецов*

*Тамбовский государственный технический университет*

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ИЗОТЕРМ ТЕПЛОЕМКОСТИ НА НУЛЕВОЕ ДАВЛЕНИЕ

При расчете параметров технологических процессов многие теплофизические свойства его участников рассматриваются в так называемом «конфигурационном» состоянии, т.е. без идеальногогазовой составляющей. В частности, большая часть уравнений для расчета изобарной теплоемкости  $C_p$  углеводородов на газовой и жидкостной ветвях пограничной кривой, полученных в рамках теории термодинамического подобия, записаны в форме

$$C_p^{(n)} - C_p^0 = f(A, \tau), \quad (1)$$

где  $C_p'$  – изобарная теплоемкость на жидкостной ветви пограничной кривой;  $C_p''$  – изобарная теплоемкость на газовой ветви пограничной кривой;  $C_p^0$  – изобарная теплоемкость в состоянии идеального газа;  $\tau$  – приведенная температура насыщения ( $\tau = T/T_{кр}$ );  $A$  – критерий термодинамического подобия. Делается это с целью упрощения характера зависимости свойства от параметра состояния и облегчения построения математической модели.

С целью оценки имеющихся в литературе [1–3] данных о  $C_p^0$ , методов ее расчета и используя собственные экспериментальные данные о  $C_p$  нормальных алканов в широкой области газового состояния, авторами получены высокоточные данные об идеальноегазовой теплоемкости углеводородов н.  $C_7$ – н.  $C_9$  в интервале температур 500 ... 620 К.

Для получения собственных экспериментальных данных о  $C_p$  авторы использовали модернизированную установку, реализующую принцип адиабатического проточного калориметра с замкнутой схемой циркуляции и калориметрическим измерением расхода. Циркуляция исследуемого вещества через

основной калориметр и калориметр-расходомер осуществлялась шестеренным насосом, разгруженным от давления. Давление в циркуляционном контуре создавалось и измерялось грузопоршневыми манометрами МП, класса 0,05. Температура на входе в основной калориметр измерялась стандартным образцовым термометром сопротивления ПТС-10 и, параллельно, абсолютной отпайкой дифференциальной шестиспайной термопары из электродов золото-платина. Такой же термопарой (но из электродов медь–константан) измерялась разность температур  $\Delta T$  на входе и выходе калориметра-расходомера. Адиабатичность основного калориметра и калориметра-расходомера контролировалась 300-спайными дифференциальными термопарами ХК с теплоизолирующим каркасом из микроволоконистой прессованной базальтовой ваты.

Расчет показал, что, с учетом всех принятых мер, доверительная граница общей погрешности измерения  $C_p$  с учетом не исключенного остатка систематической и случайной составляющих погрешности, а также ошибок отнесения, не превышает 0,4 %, при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ . В настоящее время метод является наиболее точным.

По данным об изобарной теплоемкости н.гептана, н.октана и н.нонана в паровой фазе получены значения идеально газовой теплоемкости  $C_p^0$ . Величины  $C_p^0$  получены в интервале температур от  $T_{кр}$  - (30...40) К до 620 К экстраполяцией изотерм на нулевое давление. При более низких температурах надежное выделение  $C_p^0$  затрудняется вследствие возрастания кривизны изотерм.

Наиболее надежные литературные данные о теплоемкости большой группы органических соединений в состоянии идеального газа  $C_p^0$  получены в США в период с начала второй мировой войны до конца 60-х при реализации проекта Американского нефтяного института А.Р.И.44 под руководством Хаффмана, Россини, Зволинского и сотрудников. Значения  $C_p^0$  получены с использованием спектроскопических данных на основе обобщения калориметрических измерений и квантово-механических расчетов. Таблицы данных о теплоемкости  $C_p^0$  в диапазоне температур 298-1000 К для всех рассматриваемых алканов представлены в фундаментальной работе Стала, Вестрама, Зинке [2].

Аппроксимация данных об идеально газовой теплоемкости нормальных алканов выполнена в работах Рида, Праусница, Шервуда [1] и Дюрана [3]. Авторы [1] применяли для интерполяции полином

$$C_p^0 = A + BT + CT^2 + DT^3. \quad (2)$$

Сравнение рассчитанных по уравнению (2) значений  $C_p^0$  с экспериментальными представлено на рис. 1. Для всех рассматриваемых алканов они систематически занижены и отклонения достигают 10 %.

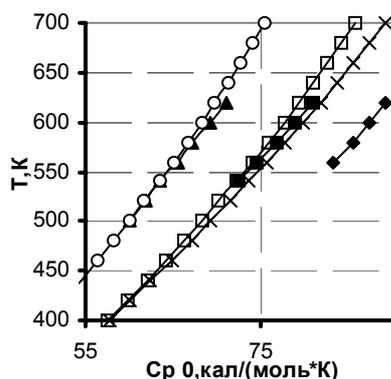


Рис. 1

Более удачная аппроксимация теплоемкости  $C_p^0$  выполнена Дюраном с сотрудниками [3]. Предложенная ими экспоненциальная зависимость (3) описывает данные [2] в интервале температур 298,16 ... 1500 К с максимальным отклонением 0,16 %, что вполне приемлемо для практических расчетов идеальногазовой теплоемкости:

$$C_p^0 = A + B e^{\frac{-C}{T^H}} \quad (3)$$

Результаты определения  $C_p^0$ , а также сравнения полученных значений  $C_p^0$  с наиболее надежными литературными данными представлены на рис. 2.

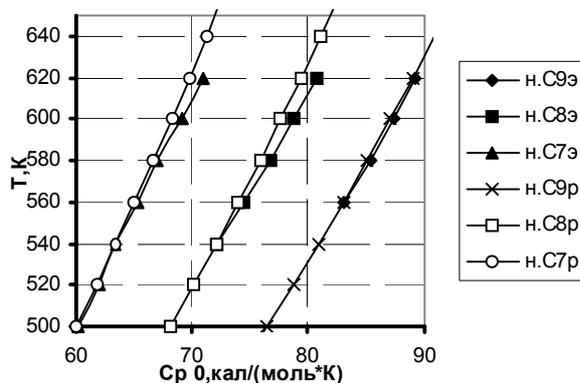


Рис. 2

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. Л.: Химия. 1982. 592 с.
- 2 Стал Д. Химическая термодинамика органических соединений / Д. Стал, Э. Вестрам, Г. Зинке. М.: Мир. 1971. 806 с.
- 3 Duran J.L., Think T.P., Ramalho R.S., Kaliaquine S. // Hydrocarbon Processing. 1976. Vol. 55, № 8. P. 153 – 156.

К.К. Кусаиынов, С.М. Мухамедин, Е.Б. Уалиев

Карагандинский государственный университет  
им. Е.А. Букетова (Казахстан)

#### ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЛАСТЕРОВ И ИХ ДИНАМИКА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ

В естественных условиях жидкость всегда содержит газовые пузыри и мелкие твердые частицы. В общем случае, часто в технических условиях, примеси представляют собой макроскопические объекты, размеры которых намного больше, чем размеры молекул, и необходимо рассматривать жидкость как гетерогенную или многофазную среду. Движение многофазной жидкости, как правило, турбулентное.

Мелкие твердые частицы, газовые пузырьки, имеющиеся в потоке жидкости, в отдельных местах скапливаются и кластеризуются, образуя некоторые фрактальные объекты. В стационарном потоке жидкости процесс кластеризации сопровождается сбалансированному ему процессу распада и каскадного дробления структур.

В механике жидкостей и физической акустике особое значение имеют кавитационные эффекты в импульсных волнах разрежения, возникающих при отражении волн сжатия от свободной поверхности жидкости. В поле таких волн на ядрах кавитации [1] вырастают парогазовые пузырьки, которые по окончании воздействия продолжают осциллировать, схлопываются или расширяются. В процессе схлопывания образовавшихся кавитационных пузырьков возникают сильные локальные перегревы и генерируются ударные волны с амплитудами давления до нескольких тысяч атмосфер.

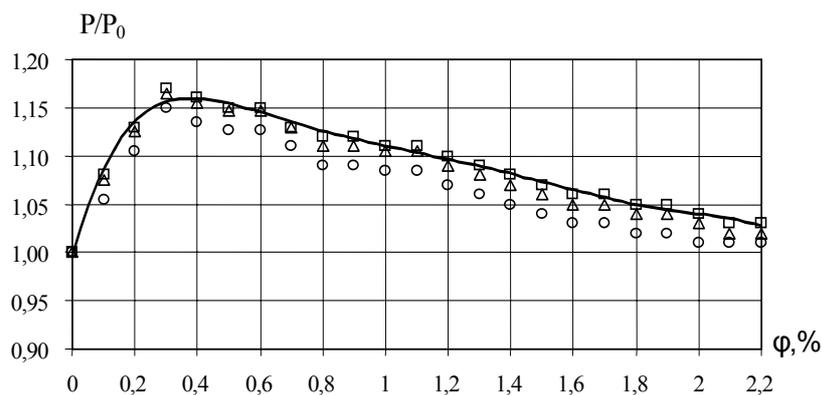
Рассматриваемое нами сложное явление – турбулентное движение двухфазной среды при наличии мощных импульсных возмущений можно анализировать в основном на уровне интегрированных, результирующих физических закономерностей.

Высоковольтный электрический разряд при достаточно быстром выделении энергии характеризуется тем, что вся вводимая в канал разряда энергия затрачивается на повышение внутренней энергии и на его расширение. Потери энергии, вызванные теплоотводом, излучением и т.п. при времени разряда длительностью  $\sim 10^{-6} \dots 10^{-4}$  с, не учитываются. В результате чего в жидкости формируются и распространяются ударные волны.

Импульсное давление на фронте ударной волны, образующейся при высоковольтном электрическом разряде в воде, широко используется в технике для интенсификации теплообмена посредством очистки пучков труб теплообменников и внутренних поверхностей котлов от твердых отложений, для прессовки, разрушения пород и др. При практическом применении из-за быстрого протекания электрогидравлического эффекта, наиболее сложным является проблема регулирования или управления энергией взрыва. Наиболее интересны с точки зрения экономичности методы регулирования ЭГЭ при неизменных электрических параметрах: варьированием степени гетерогенности рабочей среды.

Поэтому возникает практическая потребность разработки научно обоснованных методов управления послеразрядными процессами, которые позволили бы, не увеличивая общую энергию установки, выделить максимально возможное количество энергии (в виде энергии ударной волны) в рабочую среду. Величина импульсного давления (УВ) в рабочей среде зависит от структуры среды и от характера движения. Из-за многофазности рабочей среды, движение всегда является турбулентным, со структурными элементами, состоящими из когерентных вихрей, фрактальных структур или мультифрактальных объектов. Структуры образуются имеющимися дисперсными включениями в рабочей среде из газовых пузырьков и твердых частиц (песок и др.).

Таким образом, для управления величиной импульсного давления электрогидравлического эффекта без изменения электрических параметров, необходимо более глубокие исследования влияния кластеров на эволюцию импульсного давления высоковольтного электрического разряда в гетерогенных жидкостях.



**Рис. 1** Зависимость амплитуды импульсного давления от концентрации  $\text{CO}_2$  в рабочей среде:  
 $l = 6$  мм,  $P_0 = 25$  Н/м<sup>2</sup>;  $D = \square$  – 18 мм;  $\Delta$  – 25 мм;  $\circ$  – 51 мм;  
 линия – расчет

В результате экспериментальных исследований получены зависимости импульсных давлений для различных степеней газосодержания рабочей среды, диаметров «ударных труб» (рис. 1). Установлено [2, 3], что при малых концентрациях  $\text{CO}_2$ , наблюдается нелинейное поведение эволюции давления, в частности, при  $\varphi = 0,25$  % максимально достигаемое значение импульсного давления на 15 % больше, чем в однофазной жидкости. Аналогичные зависимости получены в опытах с другими ударными трубами диаметрами  $D = 18; 51$  мм. Во всех случаях при  $\varphi \sim 0,25$  % обнаружен эффект повышения амплитудного значения давления взрыва на 15 – 17 %. Анализируя результат (рис. 1), где наблюдается увеличение амплитуды давления при малых концентрациях углекислого газа, можно предположить, что оно связано с действием явления, сопровождающего электрический разряд в газожидкостной среде – кавитацией (схлопыванием пузырьков), которая обуславливает возникновение дополнительного давления. Этот эффект ранее не был изучен теоретически. Нами впервые построена мультифрактальная модель высоковольтного электрического разряда в пузырьковой газожидкостной среде, с пузырьками углекислого газа, с учетом количественных критериев степени самоорганизации структурных элементов турбулентно-

сти. Результаты численного расчета на графике приведены в виде сплошной линии. Как видно, результаты эксперимента удовлетворительно описывается предложенной теорией.

В заключение можно сделать следующий вывод: углекислый газ при малых концентрациях приводит к нелинейному эффекту и способствует увеличению амплитуды импульсного давления электро-взрыва.

### Список литературы

1 Прибатурин Н.А. Исследование возможности интенсификации насыщения жидкостей газом путем воздействия ударных волн / Н.А. Прибатурин, Д.П. Стасенко // ПМТФ. Новосибирск. 2000. Т. 41, № 2. С. 64 – 69.

2 Мухамедин С.М. Мультифрактальность политропического процесса в гетерогенных средах / С.М. Мухамедин // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. / АИЭС. Алматы, 2002. С. 43 – 47.

3 Жанабаев З.Ж. Информационные критерии степени самоорганизации в турбулентности / З.Ж. Жанабаев, С.М. Мухамедин, А.К. Иманбаева // Изв. ВУЗов. Физика. Томск. 2001. № 1. С. 72 – 77.

**Ю.Я. Печенегов, В.А. Денисов**

Технологический институт Саратовского государственного  
технического университета

## О РАСЧЕТЕ ТЕПЛООБМЕНА И СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОТОКА ГАЗА В ТРУБЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Расчет теплообмена в устройствах, работающих при высоких температурах, требует повышенной точности, чтобы надежно прогнозировать и не допускать перегревов участков поверхности теплопередачи свыше допустимых значений. Это же относится и к гидравлическому сопротивлению. Например, неточность проектного расчета потерь давления продуктов сгорания для рекуператоров печей с естественной тягой может привести при эксплуатации печи к ограничению ее тепловой мощности из-за недостаточной тяги.

Широко используемые в инженерной расчетной практике уравнения подобия не позволяют с достаточной точностью определять характеристики теплообмена и сопротивления в условиях высоких температур.

Высокую точность расчета локальных характеристик обеспечивает метод, предложенный в [1]. Метод является численным, основывается на положениях теории пограничного слоя, позволяет учитывать переменность физических свойств теплоносителя в продольном и поперечном направлениях потока, отличается простотой реализации. Последнее позволяет рекомендовать метод [1] для широкого применения и, в особенности, для рассматриваемых условий работы оборудования при высоких температурах.

Адекватность предложенной в [1] модели теплообмена проверялась путем сравнения результатов расчета с известными из литературы надежными опытными измерениями для турбулентных потоков. Получено достаточно хорошее соответствие как для локальных, так и для интегральных характеристик теплообмена в условиях существенно переменных физических свойств газа при высоких тепловых нагрузках. Модель позволяет учесть и переменность тепловых граничных условий на стенке. Для сравнения заметим, что известное уравнение подобия Петухова-Кириллова (оно получено при постоянной плотности теплового потока на стенке) при значительном изменении по длине потока тепловых граничных условий может давать погрешность, достигающую  $\pm 40\%$  и больше.

При решении гидродинамической задачи вычисляемыми характеристиками являются профиль скорости и касательное напряжение на стенке. Сравнение расчета с опытными измерениями для турбулентных потоков показало, что влияние переменности свойств теплоносителя на профиль скорости и распределение касательного напряжения по длине потока на начальном участке и участке квазистабильного течения рассматриваемый метод отражает вполне адекватно. Профиль скорости при наличии теплообмена по сравнению с изотермическим течением существенно трансформируется, но представленный в относительной форме мало отличается от изотермического, что хорошо согласуется с надежными опытными измерениями.

## Список литературы

1 Печенегов Ю.Я. Инженерный метод численного расчета теплообмена и сопротивления трения в пограничном слое. Ламинарное и турбулентное течения в трубе / Ю.Я. Печенегов // ИФЖ. 1987. Т. 52, № 2. С. 190 – 199.

*М.М. Сафаров, З.В. Кобулиев, С.Г. Ризоев*

Таджикский технический университет (Душанбе)

### ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ КРЕМНЕСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Исследуемые сплавы используются в троллейбусах в качестве токоъемников. В то же время электропроводность таких сплавов изучена недостаточно. Сплавы содержат в себе Al, Cu, Si и Sb. В исследуемых объектах изменяются содержание алюминия и кремния, а содержание меди и сурьмы остается постоянным, соответственно равным 1,5 и 10 % по массе. Авторами работ [1, 2] для расчета удельного электрического сопротивления  $\rho_3$  двойных сплавов смесей предложена следующая зависимость

$$\rho_3 = \rho_{i3}^{m_1} \cdot \rho_{13}^{m_2}, \quad (1)$$

где  $\rho_{i3}$  – удельное электрическое сопротивление  $i$ -й компоненты;  $m_i$  – объемная концентрация компоненты. Дульнев Г.Н. и др. [1] для расчета удельного электрического сопротивления  $\rho_3$  использовал формулу, полученную заменой в

$$\lambda = \lambda_2 [C_2 + v(1 - C)^2 + 2vC(1 - C)(vC + 1 - C)^{-1}], \quad v = \lambda_2/\lambda_1$$

теплопроводностей  $\lambda$  и  $\lambda_1$  удельными сопротивлениями

$$\rho_3 = \lambda^{-1} \quad \text{и} \quad \rho_{i3} = \lambda_i^{-1}, \quad \text{т. е.}$$

$$\rho_3 = \rho_{13} [C^2 + \rho_{13}\rho_{23}^{-1}(1-C)^2 + 2\rho_{13}\rho_{23}^{-1}C(1-C)((\rho_{13}/\rho_{23})C + 1 - C)^{-1}], \text{ Ом}\cdot\text{м.} \quad (2)$$

Используя уравнение (2), авторы работы [1] рассчитали удельное электрическое сопротивление для двойных сплавов Bi-Cd, Sn-Pb, Sn-Zn, Cd-Pb, Cd-Zn. Авторы получили хорошее совпадение расчетных и измеренных значений во всем диапазоне изменения концентрации компонент. Для обобщения экспериментальных данных по электропроводности исследуемых сплавов нами использовано следующее выражение

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – электропроводность кремне содержащих сплавов алюминия в зависимости от температуры  $T$ , К;  $\sigma_1$  – электропроводность исследуемых объектов при температуре  $T_1$ ;  $T_1 = 293$  К.

Экспериментальные данные хорошо укладываются вдоль общей кривой, которая описывается уравнением

$$\sigma = \left[ 0,38 \left( \frac{T}{T_1} \right)^2 - 1,67 \left( \frac{T}{T_1} \right) + 2,25 \right] \sigma_1. \quad (4)$$

Анализ значения  $\sigma_1$  для исследуемых сплавов показал, что оно является функцией концентрации кремния, которая описывается уравнением

$$\sigma_1 = 1,13 \cdot 10^{-7} n_{Si}^2 - 2,63 \cdot 10^{-6} n_{Si} + 3,8 \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

Из уравнения (4) с учетом уравнения (5) для расчета электропроводности кремне содержащих сплавов алюминия получим

$$\sigma = \left[ 0,38 \left( \frac{T}{T_1} \right)^2 - 1,67 \left( \frac{T}{T_1} \right) + 2,25 \right] (1,13 \cdot 10^{-7} n_{Si}^2 - 2,63 \cdot 10^{-6} n_{Si} + 3,8 \cdot 10^{-5}). \quad (6)$$

С помощью уравнения (6) можно вычислить электропроводность экспериментально неисследованных сплавов алюминия в зависимости от температуры. Для этого необходимо знать только значение концентрации кремния. Проверка уравнения (6) показала, что оно с погрешностью 6,3 % описывает электропроводность исследуемых сплавов алюминия в интервале температур 293 ... 673 К.

Для установления взаимосвязи теплопроводности и электропроводности сплавов алюминия в зависимости от температуры нами на плоскости  $(\lambda, \sigma)$  построен график зависимости  $\lambda = f(\sigma)$ .

Уравнение прямых имеют вид

$$\lambda = A(T) + B(T)\sigma. \quad (7)$$

Для исследуемых сплавов алюминия зависимости  $A(T)$  и  $B(T)$  от температуры описываются уравнениями

$$A(T) = -5,08 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,73 T - 14,77, \quad (8)$$

$$B(T) = 49,39 T^2 - 39461,2 T + 8,72 \cdot 10^6. \quad (9)$$

Из уравнений (7), (8) и (9) для расчета теплопроводности исследуемых сплавов алюминия нами получено следующее уравнение:

$$\lambda = (-5,08 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,73 T - 14,77) + (49,39 T^2 - 39461,2 T + 8,72 \cdot 10^6) \sigma, \quad (10)$$

По уравнению (10), зная температурную зависимость электропроводности сплавов алюминия, можно вычислить теплопроводность экспериментально неисследованных сплавов алюминия в зависимости от температуры с погрешностью 4,2 %.

### Список литературы

1 Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. Л., 1974. 264 с.

2 Lichtenecker K. Zur Widerstand sberechnung mischkristallfreier Legierungen / K. Lichtenecker // Physikalische zeitschrift. Bd. 10. 1909. Nr. 25. S. 1005 – 1008.

*П.А. Федюнин, А.А. Воробьев, Д.А. Дмитриев*

### Тамбовский военный авиационный инженерный институт

#### СИЛЬФОННЫЕ ВОЛНОВОДЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН КАК ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЖИДКИХ СРЕД

Отрезок сильфонного ВВ является частным случаем ребристой ЗС (частный случай диафрагмированного ВВ) у которого замедляющие свойства и свойства дисперсии пространственных гармоник не проявляются для волны  $H_{01}$ , а имеют место для осесимметричной волны типа  $E_{01}$ , с составляющей вектора  $\vec{E}$  вдоль направления распространения. Симметричный гофр, обладающий пространственным периодом  $T_c$ , при линейной деформации, сохраняет равенство полудлин  $T_c/2$  вне и внутри ВВ одного гоф-

ра. Такая ЗС обладает неудовлетворительными дисперсионными и замедляющими свойствами [1]. Практически, величина коэффициента замедления  $v_3$  не зависит от параметров гофра, а зависит только от переменного количества гофров на единицу длины взаимодействия, т.е. набег фазы, в этом случае, является функцией исключительно переменной длины зоны взаимодействия, со слабой зависимостью  $v_3$  (и набег фазы) от изменения радиальных параметров гофра. Чувствительность измерения величины  $\epsilon$  по набегу фазы  $\Delta\phi$  можно существенно повысить, если повысить чувствительность компенсационного изменения набег фазы от величины  $v_3$  сильфонной периодической ЗС, при ее компенсационной линейной деформации (деформации зоны взаимодействия;  $V_\phi$  объема сильфона). Нами разработан специальный комбинированный сильфонный ВВ с волной  $E_{01}$  с диэлектрическим внутренним ВВ, схематично показанный на рис. 1. Он состоит из скрепленных (спаянных) полутороидальных гофров, так что величина  $T_c = a+b \gg a$ , и  $b \gg a$ . Набег фазы вдоль такой системы

$$\Delta\phi = \Delta\phi[\lambda_r; \epsilon_{cp}(\epsilon); v_{3 \text{ сильф}}(a, b, d), v_{3ж}(\epsilon, R_ж); l_{\text{сильф}}(P_{и})], \quad (1)$$

зависит от следующих постоянных и переменных факторов:

- а) длина волны  $\lambda_r = \text{const}$ , обеспечивает одномодовый режим волны  $E_{01}$ ;
- б) средняя по объему взаимодействия величина относительной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_{cp} = \epsilon_{cp}[\epsilon, l_{\text{сильф}}, R_ж, R_1, R_2], \quad (2)$$

где  $R_ж, R_1, R_2 = \text{const}$ ;

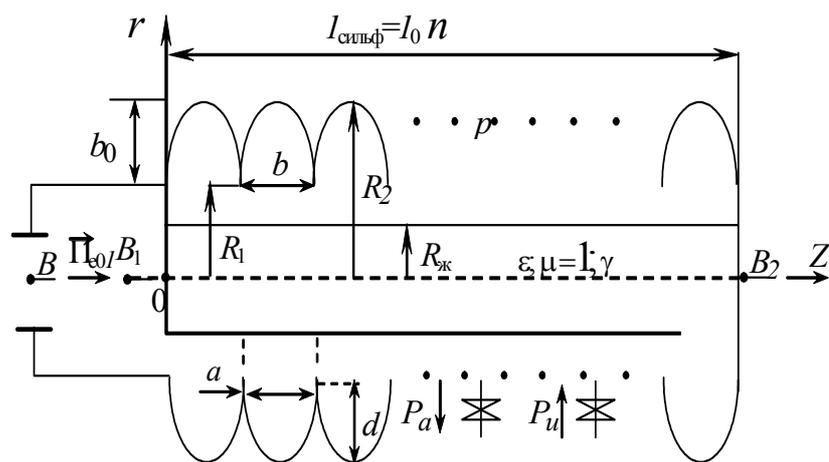
- в) коэффициент замедления периодической сильфонной ЗС

$$v_{3 \text{ сильф}} = v_{3 \text{ сильф}}[a, b, d], \quad (3)$$

где  $a = \text{const}$ , а величины  $b$  и  $d$ , функционально связаны с давлением  $P_{и}$ , т.е. с деформацией сильфона.

От деформационной вариации этих величин  $\Delta b$  и  $\Delta d$  существенно, а для  $\Delta d$  даже «критично», зависит величина  $v_{3 \text{ сильф}}$ , т.е. компенсационное значение  $\Delta\phi$ ;

- в) длина сильфона  $l_{\text{сильф}} = l_{\text{сильф}}(P_{и})$ ;
- г) коэффициент замедления диэлектрического ВВ с жидкостью  $v_3 = v_3[\epsilon_{cp}] \approx 1$ .



**Рис. 1 Комбинированный сильфонный волновод с волной  $E_{01}$  с диэлектрическим волноводом**

Конструкция предложенной сильфонной ЗС обладает следующими преимуществами:

- а) практическим отсутствием изгибной информации, присущей стандартным сильфонам;
- б) высокочувствительной зависимостью величины  $v_3$  к величине  $\Delta d$ .

При деформации многогофрового сильфона рис. 1, изменяется его общая длина  $l_{\text{сильф}} = l_0 \cdot n$  и, как следствие, величина  $d$  (при  $l_0 \uparrow, d \downarrow$  и наоборот). Один гофр сильфона рис. 2а представляет собой неоднородную коротко замкнутую длинную линию (ДЛ) переменной величины  $d$ . Ей эквивалентна

однородная ДЛ (рис. 2б) с переменной эквивалентной величиной  $d_{\text{экв}}$ , так, что при  $d_0 = \lambda_r/4$ , величина  $v_{\text{зильф}} \rightarrow \infty$  и линия теряет свойства ЗС. Таким образом, величина  $d_{\text{max}} = d + \Delta d_{\text{max}}$ , должна быть таковой, чтобы соответствующая величина  $d \leq \lambda_r/4$ . При этом величина  $R_1 = \text{const}$ .

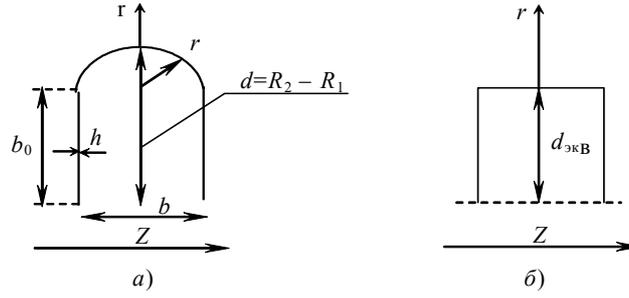


Рис. 2 К геометрическому определению глубины гофра

Перспективной является разработка сальфонной измерительной ЗС с  $R_1 = \text{const}$ , но с  $R_2 = \Phi(Z)$  (рис. 3).

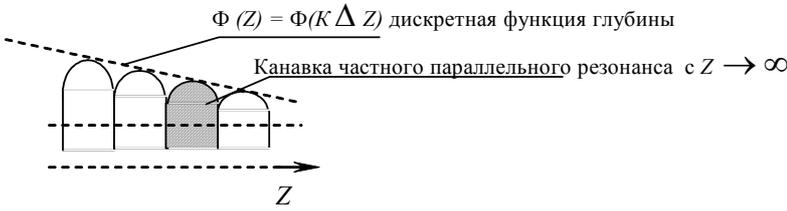


Рис. 3 К разработке сальфонной измерительной ЗС

Индикация  $\epsilon$  осуществляется по наступлению резонанса в отдельной канавке. Остальные канавки не резонируют. При изменении длины ЗС перемещается положение резонансной ячейки вдоль ЗС.

Согласно деформационному расчету элемента сальфона (одного гофра) [4], зависимости  $d$  и  $l$  сальфона от величины  $P_{\text{и}}$  имеют вид (величина  $d_{\text{экв}} \approx d$ , т.к. практически  $d_{\text{экв}} = 0,98d$ ):

$$d = b_0 + r_0 \pm \Delta d(\Delta R_2) = b_0 + r_0 + \frac{R_2 \cdot l_{\text{сильф}}}{n \times h(\pi r_0 + 2b_0)E} = \Phi_1(P_{\text{и}}), \text{ мм}; \quad (4)$$

$$l_{\text{сильф}} = n(l_0 + \Delta l_0) = n \left[ l_0 + 0,58 \frac{\pi R_1^2}{E(R_1 + R_2)} \left( \frac{R_1 + R_2}{h} \right)^3 \times P_{\text{и}} \right] = \Phi_2(P_{\text{и}}), \text{ мм}. \quad (5)$$

Подставляя выражение для  $d$  в (4) с учетом выражения (5) получим зависимость

$$v_{\text{зильф}} = \Phi_3(P_{\text{и}}). \quad (6)$$

Величина стабилизируемого набега фазы:  $\Delta \varphi$  определяется по выражению

$$\Delta \varphi = \sqrt{\epsilon_{\text{ср}}} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_r}{\lambda_{\text{кр}} E_{01}} \right)^2} \beta_r l_{\text{сильф}} v_{\text{зильф}}, \quad (7)$$

где величины  $l_{\text{сильф}}$  определяются выражением (4),  $v_{\text{зильф}}$  выражением (6), с учетом (4) и (5), т.е.

$$\Delta \varphi = \beta_{\text{сильф}}(\epsilon) l_{\text{сильф}}(P_{\text{и}}) v_{\text{зильф}}(P_{\text{и}}). \quad (8)$$

Величина  $\epsilon_{\text{ср}}$  для волны  $E_{01}$  определена методом малых возмущений, так как чувствительность характеристики  $I_{\text{сильф}} = \Phi(\epsilon)$  на порядок выше, чем для обычного сильфона. Это позволяет значительно уменьшить величину  $R_{\text{ж}}$ , что и обусловило возможность приближенного расчета величины  $\epsilon_{\text{ср}E_{01}} = f(\epsilon)$ .

#### Список литературы

- 1 Григорьев А.Д. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы / А.Д. Григорьев. М.: Радио и связь, 1984.
- 2 Новокшанов М.Н. Электродинамика и распространение радиоволн / М.Н. Новокшанов. Рига: Изд-во ВВАИУ им. Алксниса, 1981.
- 3 Корбанский И.Н. Теория электромагнитного поля / И.Н. Корбанский. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1964.
- 4 Дмитриев Д.А. Методы и устройства контроля состава и свойств ферромагнитных жидких сред в диапазоне СВЧ: Дис. ... д-ра техн. наук / Д.А. Дмитриев. Тамбов, 1998.

*И.В. Черемухина, В.Н. Студенцов, Т.А. Мацнева*

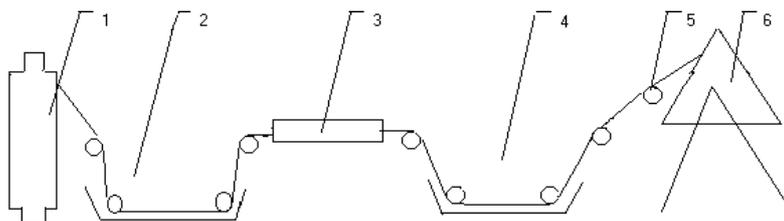
Технологический институт Саратовского государственного  
технического университета

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технический прогресс в современном машиностроении, самолето- и судостроении, радиоэлектронике, в производстве товаров широкого потребления, неосуществим без полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Потребность в ПКМ порождает создание новых прогрессивных способов их получения и переработки.

Одним из способов, повышающих прочностные характеристики ПКМ, является способ слоевого нанесения компонентов (СНК) [1]. Сущность способа СНК состоит в послойном нанесении компонентов связующего на волокнистый наполнитель (рис. 1). Для этого нить сначала пропитывают раствором смолы, а затем отверждающей системой, состоящей из защитного полимера, воды и отвердителя.



**Рис. 1 Способ СНК:**

1 – катушка с нитью; 2, 4 – пропиточные ванны; 3 – трубчатая печь;  
5 – нитеукладчик; 6 – намоточное устройство

В условиях формования при повышенной температуре и повышенном давлении и в условиях термообработки отверждение смолы на нитях происходит за счет диффузии молекул отвердителя из внешнего слоя во внутренний.

Важную роль в получении ПКМ способом СНК играет трубчатая печь 3. Создаваемый в ней температурный режим способствует удалению молекул растворителя из внешних слоев пропитываемой нити, что приводит к равномерному распределению компонентов отверждающей системы вдоль наполнителя.

В процессе работы установлены оптимальные температурные режимы и влияние времени пребывания нити в трубчатой печи на прочностные характеристики ПКМ, а также рассчитаны линейные скорости нитей при намотке (см. табл.).

Линейные скорости армирующих нитей при намотке

Наполнитель	Линейная плотность нити, Текс	Пористость наполнителя, мм	Расчетные максимальные допустимые скорости, м/с	Реально использованные скорости, м/с
Нитрон	850	0,8	0,17	0,15
Вискозная нить	290	0,8	0,19	0,16
Капрон	100	0,5	0,26	0,23

Реально использованные линейные скорости при армировании нитроном, вискозной нитью, капроном близки к расчетным значениям, что обеспечивает время пребывания в трубчатой печи 6,6; 5,0; 3,5 с соответственно, т.е. с уменьшением толщины нити необходимое время пребывания в зоне обогрева сокращалось. За это время происходит нагрев пропитанной нити и испарение растворителя.

### *Список литературы*

- 1 Пат. 2135530 РФ Студенцов В.Н., Карпова И.В. Способ получения армированных полимерных материалов / В.Н. Студенцов, И.В. Карпова // БИ. 1999. № 24.

## С Е К Ц И Я 2 S E C T I O N 2

### **НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **NEW METHODS, DEVICES AND APPARATUS FOR THERMOPHYSICAL INVESTIGATIONS**

*Ю.И. Жаврин, В.Н. Косов<sup>\*</sup>, И.В. Поярко*

НИИ экспериментальной и теоретической физики при Казахском национальном университете имени Аль-Фараби,

<sup>\*</sup>Алматинский государственный университет имени Абая

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФФУЗИИ И ДИФФУЗИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Для экспериментального изучения диффузии и ее особенностей в многокомпонентных газовых смесях используются методы, обычно применяемые при исследовании диффузии в бинарных смесях. Из этих методов некоторые рассчитаны для специальных измерений, другие не прошли всесторонней апробации, поэтому свой выбор мы остановили на трех широко известных и наиболее часто используемых: метод двухколбового прибора, стационарный проточный метод и метод Лошмидта.

**Метод двухколбового диффузионного прибора** является одним из классических методов, который используется при измерении коэффициентов взаимной диффузии (КВД), самодиффузии, термодиффузии, изучении диффузионного бароэффекта в широкой области параметров (давление, температура, концентрация).

Метод двухколбового диффузионного прибора использовался нами при исследовании многокомпонентной диффузии. Наряду с положительными сторонами этого способа, отмеченными выше, имеются и ряд недостатков, на которые необходимо обратить внимание. Во-первых, значительная продолжительность экспериментов (при больших давлениях может достигать нескольких суток). Во-вторых, усредненностью (по сечению и по длине диффузионного пути) получаемых коэффициентов диффузии. В-третьих, необходимостью выдерживать те допущения, которые заложены при выводе расчетной формулы метода (об этих допущениях будет сказано ниже). В методе двухколбового прибора рассматривается квазистационарный процесс диффузии, газов в противоположных направлениях вдоль диффузионного канала площадью поперечного сечения  $S$  и длины  $L$  из одного сосуда объемом  $V_1$  в другой объемом  $V_2$ , когда естественным образом реализуется среднечисловая (среднеобъемная) система отсчета.

Выражение для коэффициента взаимной диффузии будет иметь вид

$$D = \frac{L}{S\tau} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)} \cdot \ln \frac{\Delta x_0}{\Delta x_\tau}, \quad (1)$$

где  $\Delta x_0$ ,  $\Delta x_\tau$  – разности концентраций (в мольных долях) между колбами аппарата в начальный и конечный моменты времени;  $\tau$  – время диффузии.

При выводе формулы (1) принимают ряд допущений: о быстром наступлении квазистационарного состояния в диффузионном канале, о мгновенном выравнивании концентраций газов в колбах прибора, объем диффузионного канала должен быть значительно меньше объема колб, КВД не зависит от концентрации. Однако при постановке эксперимента не всегда удается соблюсти некоторые ограничения и, поэтому в расчетную формулу (1) приходится вводить поправки. Например, это относится к длине канала. Из-за влияния диффузионного сопротивления его геометрическая длина заменяется на эффективное значение.

Необходимо отметить, что формула (1) получена в предположении идеальности диффундирующих газов. Тем не менее, в ряде работ двухколбовый метод применялся для исследования диффузии в реальных газах. В этом случае расчетную формулу приходилось несколько видоизменять, вводя в нее соответствующим образом сжимаемость компонентов.

В многокомпонентных системах нами измерялись эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД), которые введены по аналогии с КВД первым законом Фика. При этом весь математический аппарат, который использовался для нахождения КВД, может быть повторен при выводе расчетной формулы для ЭКД  $i$ -го компонента в  $n$  компонентной смеси. Формула будет иметь такую же запись как (1), в которой

разности концентраций на концах диффузионного канала в начальный момент времени и ко времени  $\tau$   $\Delta x_{i0}$ ,  $\Delta x_{i\tau}$  будут относиться к  $i$ -му компоненту.

**Стационарный проточный метод** также достаточно широко применяется для исследования диффузии. Экспериментаторы ценят в нем ряд преимуществ перед другими методами, например, отсутствие запирающих устройств, экспрессность, хорошую воспроизводимость результатов. Но главным его преимуществом является возможность совмещения с прибором любой системы отсчета.

Однако необходимо отметить и недостатки этого метода. Во-первых, большая чувствительность установки к внешним воздействиям. Во-вторых, работа на установке требует от экспериментатора определенных навыков. В третьих, экспериментальная установка сложна в изготовлении, громоздка и работа на ней связана с большим расходом газов.

Для расчета КВД в среднеобъемной системе отсчета используется формула

$$D = \frac{vxL}{S(1-x)}, \quad (2)$$

где  $v_1 = v_2 = v$  – объемные скорости газов на входе в ячейку;  $x_1 = x_2 = x$  – концентрации перешедшей части компонентов на выходах из ячейки;  $L$ ,  $S$  – длина и площадь поперечного сечения диффузионного канала соответственно.

При диффузии одного газа в смесь двух других (скорости газов на входе в ячейку равны) для среднеобъемной системы отсчета ЭКД компонентов определяются по формулам

$$D_i^{\text{эф}} = \frac{vx_i L}{S(x_{0i} - x_i)}, \quad i = 1, 2; \quad D_3^{\text{эф}} = \frac{vx_3 L}{S(1 - x_3)}, \quad (3)$$

где  $x_{0i}$  – исходная концентрация  $i$ -го компонента в смеси;  $x_i$  ( $i = 1, 2$ ),  $x_3$  – концентрации перешедшей части компонентов на выходах из ячейки.

**Метод Лошмидта.** Диффузионная установка, реализующая метод Лошмидта, представляет из себя две одинаковые вертикальные трубки, которые герметично закреплены в двух хорошо притертых друг к другу дисках. Вращением верхнего диска относительно неподвижного нижнего трубки сообщаются или разобщаются между собой. Аппарат прост в обращении, его конструкция и геометрические параметры, как правило, соответствуют математической постановке задачи для нестационарного диффузионного процесса.

Экспериментальное значение ЭКД  $i$ -го компонента –  $D_i^{\text{эф}}$  вычисляется по формуле

$$\frac{\bar{c}_{i\text{н}} - \bar{c}_{i\text{в}}}{\bar{c}_{i\text{н}} + \bar{c}_{i\text{в}}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_i^{\text{эф}} \tau}{L^2}\right), \quad (4)$$

где  $\bar{c}_{i\text{в}}$  и  $\bar{c}_{i\text{н}}$  – усредненные концентрации компонента  $i$  к концу опыта в верхней и нижней трубках прибора;  $L$  – длина диффузионной трубки;  $\tau$  – время опыта.

Анализ методов расчета многокомпонентной диффузии свидетельствует, что наилучшее количественное описание наблюдаемых в эксперименте диффузионных потоков дают уравнения Стефана-Максвелла. На базе этих уравнений были разработаны методы расчета диффузионных процессов в аппаратах рассмотренных выше. Результаты вычислений непосредственно сопоставлялись с данными, полученными из экспериментов. Совпадение расчета с экспериментом, в основном, в пределах погрешности измерений свидетельствовало, что методика определения диффузионных характеристик, предложенная нами, может с успехом применяться к различным массообменным процессам. Эта методика использовалась при разработке таблиц рекомендуемых справочных данных по диффузии технически важных газов и их смесей.

Изучение многокомпонентного массопереноса в замкнутых приборах (двухколбовый аппарат, аппарат Лошмидта) позволяет выявить особенности диффузионного процесса: эффекты Тура, диффузионный затвор, колебания концентраций. Эти особенности достаточно подробно описаны в литературе и мы не будем на них останавливаться.

Свое внимание мы обратим на самую интересную и существенно, влияющую на многокомпонентный массоперенос особенность, в частности, диффузионную неустойчивость (нестабильность). Влияние

отдельных параметров, связанных с возникновением и развитием неустойчивого процесса в диффузионном канале можно исследовать всеми методами, в частности, это относится к концентрации, коэффициентам диффузии, ориентации диффундирующих смесей, возможностью реализовать визуализацию процесса.

Однако наибольшими возможностями обладает диффузионный аппарат в двухколбовом методе. Дополнительно двухколбовым методом можно исследовать влияние на неустойчивость: температуры до предела работоспособности уплотняющих материалов, а это несколько сот градусов; давления до 15 МПа (верхний рабочий предел нашего аппарата); геометрии диффузионного канала (диаметра и длины, например, изменение диаметра очень простая операция). Материал, из которого сделан аппарат, позволяет проводить эксперименты с агрессивными газами (мы работали со смесями, содержащими аммиак).

Аппарат применялся для решения специальных задач, связанных с неустойчивым процессом, например, изучения влияния: положения диффузионного канала относительно вертикальной прямой на возникновение неустойчивости; градиента температуры; вращения и колебания диффузионного аппарата; колебательного характера изменения концентраций при неустойчивости. Во всех этих случаях изготавливались специальные приспособления, которые не вносили принципиальных изменений в работу двухколбового аппарата, а функциональные возможности метода значительно расширялись. Нельзя не подчеркнуть, что расходы газов при проведении одной и той же серии экспериментов во всех методах различно. Меньше всего их нужно для двухколбового метода.

Важный, с нашей точки зрения момент, необходимо отметить о методе Лошмидта. Именно этот метод позволил Миллеру и Мейсону открыть явление диффузионной неустойчивости в многокомпонентных газовых смесях. Это стало возможным, потому что диаметр диффузионной трубки в аппарате Лошмидта был примерно 3 см и неустойчивость возникла при атмосферном давлении. В противоположность этому диаметры диффузионных каналов в двухколбовом аппарате и ячейке стационарного метода при исследовании многокомпонентной диффузии составляли порядка 1,5 ... 1 мм, а то и меньше. Экспериментаторы, изучающие диффузию, полагали, что наилучшим диффузионным каналом будет тот, у которого отношение длины к диаметру  $L/d$  будет равно 50 и более. Как показали исследования, для возникновения неустойчивости в аппаратах этих методов диаметры каналов должны были превышать критический размер равный 2,65 мм. Влияние диаметра велико, что можно проследить по числу Релея, которое характеризует возникновение конвекции. В число Релея характерный размер (в нашем случае радиус) входит в четвертой степени.

Полученные экспериментальные результаты исследования диффузии и диффузионной неустойчивости рассмотренными выше методами на сегодняшний день, могут быть получены расчетом. Многокомпонентный диффузионный процесс в двухколбовом аппарате описывается программой, составленной на основе уравнений Стефана-Максвелла. Если система диффузионно неустойчивая, то также имеется программа (составлена на базе программы Mathcad 2001), которая позволяет в трехкомпонентных газовых смесях определять границу перехода от молекулярной диффузии к концентрационной конвекции в зависимости от состава смеси и давления. Определив границу перехода, можно организовать проведение эксперимента в двухколбовом аппарате таким образом, что будут измерены ЭЖД и концентрации компонентов для любого момента времени.

*И.В. Кораблев, Ю.И. Беляев, Д.П. Вент,  
О.Н. Вепренцева*

Московский государственный университет инженерной экологии,  
Российский химико-технологический университет  
им. Д.И. Менделеева Новомосковский институт

## **ИЗМЕРИТЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ КБ «ТЕПЛОФОН»**

В настоящее время работа большинства существующих приборов для измерения теплопроводности основана на методе стационарного теплового потока. Такие приборы обладают рядом недостатков:

- большая продолжительность измерительного цикла;
- наличие утечек тепла, что отрицательно сказывается на точности измерений;

- измерение теплопроводности образцов фиксированной формы и размеров.

Нами разработан метод интегрального преобразования уравнения Фурье, позволяющий создавать приборы, лишенные приведенных выше недостатков. Метод относится к нестационарным методам определения теплофизических свойств различных материалов и основан на экспериментальном нахождении температурного поля в теле заданной формы. Рассмотрим работу метода на примере определения коэффициента теплопроводности образца, выполненного в виде прямоугольной пластины (рис. 1). Будем считать, что потери тепла с боковых поверхностей образцов имеют малую величину.

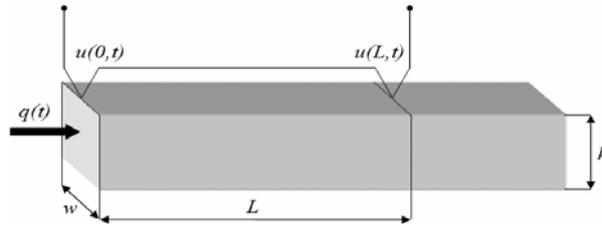


Рис. 1

Для тонкой прямоугольной пластины передача тепла подчиняется уравнению линейной теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad x \in [0, L], t \in [0, T], \quad (1)$$

где  $c$ ,  $\lambda$  – соответственно коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности;  $\rho$  – плотность вещества;  $q(t)$  – тепловой поток через сечение площадью  $hw$ ;  $u(x,t)$  – температура, как функция длины интервала и времени;  $h$ ,  $w$  – соответственно толщина и ширина пластины.

Имеется информация о разности температур, измеренная на границах интервала  $[0, L]$ , т.е.:

$$u(0,t) - u(L,t) = \Delta u(t), \quad (2)$$

и количество теплоты, поступающее в пластину за время измерения  $T$ ,

$$Q(0,t) = Q(t) \Big|_{t=0}^{t=T}, \quad (3)$$

Расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности может быть получена многократным интегрированием (1) по  $x$  и  $t$ . После преобразования получаем

$$\frac{LQ(t) \Big|_{t=0}^{t=T}}{hw} = \lambda \int_0^T [u(0,t) - u(L,t)] dt + c\rho \int_0^L \int_0^x u(x,t) dx dx \Big|_{t=0}^{t=T}, \quad (4)$$

Наложим условие совпадения температурного поля пластины в моменты  $t = 0$  и  $t = T$ , т.е.

$$u(x,0) = u(x,T), \quad (5)$$

Тогда с учетом (2), (3) и (5) из (4) выразим коэффициент теплопроводности и введя калибровочный коэффициент  $k$ , определяемый измерением эталонных образцов, получим

$$\lambda = \frac{kLQ(t) \Big|_{t=0}^{t=T}}{hw \int_0^T \Delta u(t) dt}. \quad (6)$$

Расчет теплопроводности по (6) требует, чтобы тепловой поток через пластину был равномерным. На практике при создании прибора это потребовало бы использование нагревательного элемента одинаковой ширины с измеряемым образцом, т.е. прибор позволял бы работать с образцами только одного размера, что не очень практично. Так как зачастую необходимо измерять образцы различных размеров и формы (пластины, диски), то в формуле (6) нельзя напрямую использовать значение ширины образца. Его необходимо заменить параметром геометрической формы  $F(w)$ , который учитывал бы влияние геометрии образца (размеры, форма) на результаты измерений. Для этого нами измерялись значения теплопроводности

набора образцов выполненных из меди, алюминия, углеродистой (марка 15) и хромоникелевой (марка 1Х18Н9Т) стали в виде пластин размерами 5×7, 10×12, 15×17, 20×25, 30×35, 40×50 мм толщины 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 мм и дисков диаметрами 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 40, 50 мм толщины 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 мм. В результате проведенных исследований было установлено, что параметр  $F(w)$  зависит только от размеров (длина, ширина, диаметр) и формы (пластина, диск) образца (рис. 2) и не зависит от теплопроводности образца и его толщины.

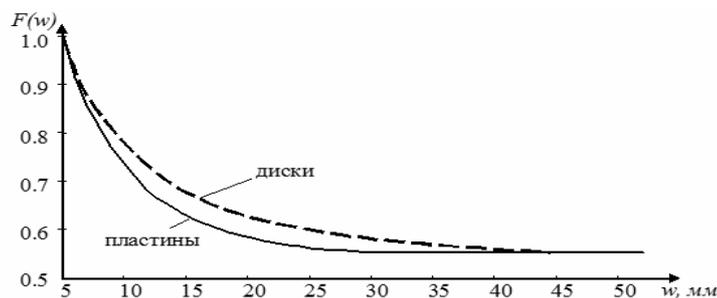


Рис. 2

Заменив в (6)  $w$  на  $F(w)$

$$\lambda = \frac{kLF(w)Q(t)|_{t=0}^{t=T}}{h \int_0^T \Delta u(t) dt} \quad (7)$$

Полученная таким образом формула позволяет вычислять коэффициент теплопроводности образцов с любыми параметрами геометрии.

На основе проведенных исследований нами создан уникальный по точности, удобству и быстродействию компьютерный измеритель теплопроводности КИТ-02Ц.

Прибор предназначен для измерения теплопроводности металлов, металлокерамики и других материалов в диапазоне 10 ... 600 Вт/мК. Пределы допускаемой основной погрешности составляют  $\leq 5\%$ , а повторяемость показаний  $\leq 2\%$ . Подготовка



Рис. 3

прибора к измерению и непосредственно сам процесс измерения занимают не более 1–2 минут. Перед измерением не нужно проводить предварительную подготовку образцов и нарушать целостность образца, например, сверлить отверстия для укладки термопар, т.е. прибор позволяет проводить поточное измерение теплопроводности. Прибор позволяет измерять теплопроводность образцов, выполненных в форме прямоугольных пластин размерами от 5×5 мм толщиной от 0,5 до 2 мм или дисков диаметром от 5 мм аналогичной толщины.

Прибор состоит из следующих компонентов: теплоизмерительная ячейка, электронный блок, компьютер с платой АЦП и программным обеспечением.

Принцип действия прибора основан на импульсном нагреве и отводом тепла в теплоприемник. С помощью дифференциальной термопары с образца снимается разность температур. Электронный блок усиливает сигнал, поступающий с теплоизмерительной ячейки, и передает его на плату АЦП компьютера. Программа обработки данных на основе информации о температуре образца и количестве тепла, поступившего в образец.

Теплоизмерительная ячейка предназначена для нагрева и охлаждения образца, а также для съема с образца данных о его температуре.

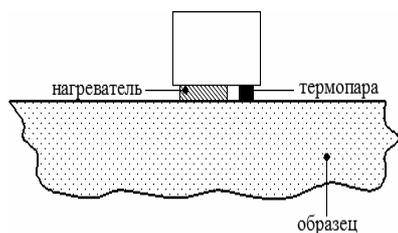
В теплофизических измерениях при контактном способе измерения большое влияние на результаты оказывают контактные термические сопротивления. Разработанная нами конструкция блока термопар

обеспечивает надежный контакт термопар с образцом. Для этого блок термопар обладает тремя степенями свободы перемещения в пространстве. Для удобства укладки образцов колпак теплоизмерительной ячейки с блоком термопар выполнен поворачивающимся, поэтому сам процесс подготовки ячейки к измерению занимает считанные секунды.

Электронный блок предназначен для усиления и передачи на плату АЦП компьютера сигнала, поступающего с теплоизмерительной ячейки.

Программное обеспечение, входящее в состав прибора, реализует специальную методику математической обработки результатов, учитывающую параметры геометрии образцов, потери тепла в процессе измерения и позволяющую добиться высокой точности и скорости работы прибора. Программное обеспечение позволяет полностью управлять процессом измерения, просматривать, анализировать и сохранять результаты измерений в файлы, а также печатать отобранные результаты в виде таблиц с указанием времени и даты проведения измерений, номера, размера, вида материала, значений теплопроводности.

На базе компьютерного измерителя теплопроводности КИТ-02Ц нами созданы модификация прибора для измерения теплопроводности пленочных покрытий нанесенных или напыленных на металлическое основание толщиной 10 ... 100 мкм.



**Рис. 4** Конструкция теплоизмерительного зонда

Нашей последней разработкой является модификация прибора КИТ-03А для измерения теплопроводности строительных материалов (кирпичи, плиты, панели и т.д.) и конструкций (стены, перекрытия и т.д.). Структурно он повторяет компьютерный измеритель теплопроводности КИТ-02Ц и

обладает всеми его достоинствами, но имеет отличающуюся конструкцию датчика. Вместо теплоизмерительной ячейки используется теплоизмерительный зонд (рис. 4).

Из приведенного выше следует, что прибор при помощи размещаемых на поверхности изделия теплоизмерительных зондов с различными диаметрами нагревателя позволяет измерять теплопроводность материала изделия на различную глубину, не нарушая при этом его целостности.

#### Список литературы

1 Беляев Ю.И. Помехоустойчивый контроль параметров полей в системах экологического мониторинга / Ю.И. Беляев, И.В. Кораблев, Д.П. Вент // Приборы. 2003. №1(31). С. 35 – 38.

*В.А. Петров*

Институт теплофизики экстремальных состояний  
Объединенного института высоких температур РАН (Москва)

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полупрозрачные материалы и вещества широко используются при высоких температурах в различных областях промышленности. Как правило, технологические процессы изготовления изделий из полупрозрачных материалов также проводятся при высоких температурах. Поэтому измерение истинной температуры таких материалов является очень важной задачей. Вместе с тем эта задача является чрезвычайно трудной, поскольку из-за пропускания внешнего теплового излучения и влияния собственного излучения контактные методы измерения температур непригодны, а обычные бесконтактные методы имеют большую погрешность.

Полупрозрачные материалы делятся на две большие группы. Первую группу составляют нерассеивающие тепловое излучение материалы, к которым относятся монокристаллы диэлектриков и полупроводников и стекла, а также некоторые органические материалы. Вторую группу представляют рассеивающие материалы типа пористых и вспененных керамик из диэлектриков и полупроводников, волокнистые материалы, плазменнонапыленные и лакокрасочные покрытия.

Тепловое состояние изделий из полупрозрачных материалов и веществ в значительной мере определяется совместным радиационно-кондуктивным переносом энергии (РКПЭ) внутри полупрозрачного материала. Это обстоятельство необходимо учитывать при контроле теплового состояния изделий в ходе проведения высокотемпературных технологических процессов, при измерении поверхностных температур и определении полей температур внутри изделия.

### 1 Измерение истинной температуры поверхности

Оптические свойства полупрозрачных нерассеивающих материалов характеризуются показателем преломления  $n = c_0/c$ , где  $c_0$  и  $c$  – скорость распространения излучения в вакууме и рассматриваемом материале соответственно, и коэффициентом поглощения  $\alpha$ , являющимся коэффициентом пропорциональности для ослабления интенсивности излучения в законе Бугера  $dI = -\alpha I dl$  или связанным с ним показателем поглощения  $\kappa = \alpha\lambda/4\pi$ , где  $\lambda$  – длина волны. Отражение поверхности при падении излучения по нормали рассчитывается по формуле  $\rho_n = ((n-1)^2 + \kappa^2) / ((n+1)^2 + \kappa^2)$ . У диэлектриков вблизи коротковолнового края первой фундаментальной полосы колебаний атомов в молекуле, где материал является непрозрачным, всегда имеется участок длин волн, где  $n \approx 1$ , а  $\kappa$  еще мало. Это дает возможность путем регистрации излучения в таком участке спектра измерить истинную температуру поверхности, поскольку здесь  $\rho_n \approx 0$ , и собственное излучение полупрозрачного материала соответствует излучению абсолютно черного тела. Достоинства такого метода обусловлены тем, что нет необходимости учитывать влияние отраженного внешнего излучения, не нужно знать оптические свойства или терморadiационные характеристики материала, и измеряемая температура является истинной, а не яркостной, как в обычных методах пирометрии. Возможные ограничения метода могут быть связаны с плохим отношением сигнал/шум и недостаточной чувствительностью сигнала к изменению температуры, поскольку используемый участок спектра, как правило, находится в средней ИК-области. Иногда также необходимо принимать во внимание ослабление излучения в окружающей атмосфере, что ведет к дополнительной погрешности в измерении температуры.

Истинная температура поверхности рассеивающих диэлектрических материалов может быть также измерена путем регистрации излучения в области длин волн, где  $n \approx 1$ , а  $\kappa$  – мало, однако дополнительным требованием является малость альбедо рассеяния  $\omega \rightarrow 0$ , т.е. коэффициент поглощения должен быть много больше коэффициента рассеяния  $\alpha \gg \beta$ . При этом коротковолновая граница используемого спектрального интервала сдвигается в сторону больших длин волн по сравнению с нерассеивающим материалом.

Область резонансного поглощения полупроводников на колебаниях атомов в решетке находится в дальней ИК части спектра, не пригодной для пирометрии из-за малого количества излучаемой здесь энергии. В средней ИК области спектра поглощение обусловлено в основном свободными носителями и коэффициент поглощения растет с увеличением длины волны. На фоне этого плавного роста обычно видны немонотонности, связанные с многофононным поглощением. Область высокой прозрачности существует лишь у очень чистых полупроводников, например, у кремния оптического качества, и ее спектральная ширина весьма ограничена. Величина коэффициента поглощения в ИК области сильно зависит от температуры и концентрации примесей и для каждого кристалла должна определяться экспериментально. Поэтому истинная температура поверхности полупроводников на основе регистрации излучения в средней ИК- области не может быть измерена.

### 2 Пирометрия приповерхностного слоя

По мере продвижения от видимой в ИК-область, начиная с некоторой длины волны коэффициент поглощения диэлектриков начинает увеличиваться (область многофононного поглощения). По мере увеличения коэффициента поглощения уменьшается толщина приповерхностного слоя, излучение которого выходит наружу. Так, например, при  $\alpha = 100 \text{ см}^{-1}$  толщина излучающего слоя порядка 0,01 см. Это означает, что в большинстве случаев перепад температуры в таком приповерхностном слое очень мал, и путем регистрации его излучения может быть измерена температура поверхности. Отличие данного метода от пирометрии при  $n \approx 1$  заключается в том, что здесь необходимо принимать во внимание

отражение поверхности. Поскольку излучающий слой является оптически бесконечным, а показатель поглощения  $\kappa$  малым,  $\rho_n = (n-1)^2 / (n+1)^2$ . Излучательная способность, соответственно, равна  $\varepsilon_n = 1 - \rho_n$ . Измеренная температура в этом случае является яркостной, и для ее пересчета в истинную нужно знать показатель преломления. Он, как правило, хорошо известен и мало меняется с температурой. К тому же для большинства диэлектриков он сравнительно невелик, и при отсутствии рассеяния вполне возможно достичь значения  $\varepsilon = 0,96 \dots 0,97$ . В большинстве промышленных пирометров для измерения температуры диэлектриков применяется именно этот метод. Его преимуществом по сравнению с методом при  $n \approx 1$  является использование более коротковолнового излучения, что обеспечивает большую чувствительность сигнала пирометра к изменению температуры. Недостатком же является возможность влияния внешнего отраженного излучения.

Для пирометрии полупроводников наиболее подходящей является область спектра вблизи длинноволнового края собственного электронного поглощения, в интервале длин волн, где величина коэффициента поглощения при комнатной температуре порядка  $100 \text{ см}^{-1}$ . При этом необходимо знать величину показателя преломления с высокой точностью для введения поправки на отражение поверхности. Измерить истинную температуру поверхности полупроводников путем регистрации излучения в области многофононного поглощения практически невозможно.

Пирометрия приповерхностного слоя органических веществ и материалов, как правило, основана на регистрации излучения в полосе колебаний связи С—Н при  $3.43 \text{ мкм}$ . Ввиду большой величины коэффициента поглощения в этой полосе излучающий слой имеет толщину всего около  $0,03 \text{ мм}$ . При этом  $\varepsilon_n \approx 0,96$ .

Метод может быть использован и для пирометрии рассеивающих диэлектриков, однако наличие рассеяния может привести к увеличению поправки на отличие измеренной яркостной температуры от истинной и увеличить влияние внешнего отраженного излучения.

### 3 Пирометрия изотермического плоского слоя

Если плоский слой нерассеивающего полупрозрачного материала имеет небольшую толщину, то перепад температур на такой толщине может быть мал, и можно на основании измеренной яркостной температуры рассчитать истинную. При этом излучательная способность слоя с оптически гладкими поверхностями в области полупрозрачности рассчитывается на основании известных данных по коэффициенту поглощения  $\alpha$  и показателю преломления  $n$  с учетом многократных отражений. В направлении нормали для слоя толщиной  $L$  излучательная способность

$$\varepsilon_n = \frac{(1 - \rho_n)[1 - \exp(-\alpha L)]}{1 - \rho_n \exp(-\alpha L)}, \quad \text{где } \rho_n = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}.$$

Важным преимуществом данного метода является возможность использования области длин волн, на которую приходится максимум планковской интенсивности излучения. Однако необходимость знать температурную и спектральную зависимости  $\alpha$  и  $n$  зачастую сводят это преимущество на нет.

Осуществить измерение температуры по излучению изотермического плоского слоя рассеивающего материала в области полупрозрачности практически невозможно, так как для расчета  $\varepsilon$  в общем случае нужно знать дополнительно коэффициент и индикатрису рассеяния. Однако, если коэффициент рассеяния велик, и составляет, например  $50 \text{ см}^{-1}$ , что является вполне вероятным для керамик с пористостью порядка  $10 \%$ , то излучение выходит из приповерхностного слоя толщиной около  $0,2 \text{ мм}$ , где перепад температур невелик. Истинную температуру этого слоя можно определить по измеренной яркостной и экспериментально определенной излучательной или отражательной способности.

Во всех рассмотренных выше случаях необходимо принимать во внимание возможное влияние внешнего излучения, которое будет отражаться от полупрозрачного материала.

### 4 Определение температурного распределения в полупрозрачном нерассеивающем материале

Поле температуры в полупрозрачном нерассеивающем материале определяется совместным радиационно-кондуктивным переносом энергии. Уравнения РКПЭ могут быть решены и поле температуры опре-

делено, если известны температурные и частотные зависимости коэффициента поглощения и показателя преломления, температурная зависимость истинного (кондуктивного) коэффициента теплопроводности, а также соответствующие граничные условия. Однако определение поля температур путем расчета РКПЭ на практике никогда не реализуется, так как это связано с недостаточной точностью исходных данных. Практическое применение находит лишь восстановление температурного поля по результатам измерений интенсивности излучения, выходящего из плоского слоя полупрозрачного материала на основе решения уравнения переноса излучения методом инверсии. С этой целью измеряются интенсивности выходящего излучения на ряде частот, которые выбираются таким образом, чтобы приемник излучения (спектрометр или спектро радиометр) регистрировал излучение, выходящее со всей глубины слоя. Инвертирование уравнения переноса, являющегося нелинейным интегральным уравнением Фредгольма первого рода, является очень сложной проблемой. Из-за того, что результаты измерений интенсивности выходящего из слоя излучения всегда имеют те или иные погрешности, инвертирование часто приводит к неустойчивости решения и нестабильности получаемых результатов. Суть процесса инвертирования сводится к тому, что уравнение переноса излучения решается многократно с предполагаемым температурным распределением, коэффициенты которого уточняются. В процессе расчетов минимизируется функция, определяемая разностью расчетных и измеренных значений интенсивности излучения для различных длин волн или различных направлений визирования. Погрешность в определении полей температуры этим методом при хорошей точности данных по оптическим свойствам материала может составлять несколько процентов.

Поле температуры можно определить точнее, если знать какое-либо значение температуры полупрозрачного материала. Это значение должно быть определено экспериментально. Такой подход составляет основу расчетно-экспериментального метода определения полей температур. При его реализации в качестве одного из граничных условий РКПЭ используют измеренное значение температуры поверхности полупрозрачного материала путем регистрации излучения в области непрозрачности при  $n \approx 1$ . Поле температуры получается как результат решения прямой задачи РКПЭ в предположении, что известны все оптические свойства и истинный коэффициент теплопроводности.

## Доклады

*А.Г. Дивин, С.В. Мищенко, С.В. Пономарев,  
Г.В. Мозгова*

Тамбовский государственный технический университет

### **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ\***

В результате исследований [1] установлено, что как механические, так и теплофизические характеристики растворов и расплавов полимерных материалов зависят от надмолекулярной структуры, возникающей в результате переориентации макромолекул материалов в ходе технологического процесса их переработки. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  при этом превращается в тензор  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{zz} & \lambda_{zr} & \lambda_{z\varphi} \\ \lambda_{rz} & \lambda_{rr} & \lambda_{r\varphi} \\ \lambda_{\varphi z} & \lambda_{\varphi r} & \lambda_{\varphi\varphi} \end{pmatrix},$$

где  $\lambda_{zz}$ ,  $\lambda_{zr}$ ,  $\lambda_{z\varphi}$ ,  $\lambda_{rz}$ ,  $\lambda_{rr}$ ,  $\lambda_{r\varphi}$ ,  $\lambda_{\varphi z}$ ,  $\lambda_{\varphi r}$ ,  $\lambda_{\varphi\varphi}$  – компоненты тензора теплопроводности;  $r$ ,  $z$ ,  $\varphi$  – пространственные координаты.

Доказано [2], что температурное поле в потоке анизотропного материала зависит главным образом от второго диагонального компонента тензора теплопроводности  $\lambda_{rr}$ .

\* Работа проводилась в соответствии с проектом РФФИ № 02-02-17587.

Для исследования зависимости значения  $\lambda_{rr}$  и реологических характеристик полимерных материалов от скорости сдвига предложены измерительное устройство и автоматизированная измерительная установка.

Основу измерительного устройства составляют два коаксиальных цилиндра, между которыми находится исследуемый материал. Внешний цилиндр при этом способен вращаться, а во внутреннем расположен цилиндрический источник тепла.

Получена математическая модель распределения температурных полей в слоях цилиндрической системы измерительного устройства при выделении тепла от источника во внутреннем цилиндре и за счет диссипации механической энергии за счет сил вязкого трения при сдвиговом течении исследуемого материала в зазоре между цилиндрами[3].

В ходе решения обратной задачи теплопроводности было получено расчетное соотношение для значения  $\lambda_{rr}$ , с использованием результатов измерения среднеинтегральной температуры в заданном слое измерительного устройства и реологических характеристик исследуемого полимерного материала.

Проведена калибровка измерительной установки с использованием стандартных образцов с известными теплофизическими и реологическими характеристиками: дистиллированная вода, этиловый спирт, глицерин.

### Список литературы

- 1 Харитонов В.В. Теплофизика полимеров и полимерных композиций / В.В. Харитонов. Мн.: Выш. школа, 1983. 162 с., ил.
- 2 Мищенко С.В. Метод, устройство и автоматизированная система для исследования зависимости теплофизических свойств жидкостей от скорости сдвига / С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, А.Г. Дивин // Вестник ТГТУ. 1995. № 1.
- 3 Дивин А.Г. Разработка математической модели устройства для измерения теплофизических характеристик расплавов полимерных материалов в условиях сдвигового течения / А.Г. Дивин, Г.В. Банникова // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов: Вып. 9. 2001. 184 с.

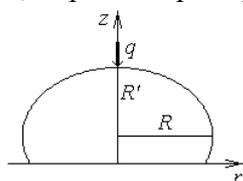
*С.В. Бузилов, Л.Д. Загребин, О.Е. Каракулов*

ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет»

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ (МЕТОД КАПЛИ)

В работах [1, 2] нами был рассмотрен импульсный метод измерения теплопроводности для образцов в форме капли, позволяющий определять свойства в твердом и жидком состояниях, а поверхность образца в первом приближении аппроксимировалась сферой. В случае если сила тяжести превышает силу поверхностного натяжения, образцы приобретают форму капли, близкую к эллипсу.

Рассмотрим тепловую модель в виде эллипса (рис. 1). При воздействии мгновенного точечного импульса теплового потока в полюсе образца решение уравнения теплопроводности



**Рис. 1** Тепловая модель

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

с граничными условиями

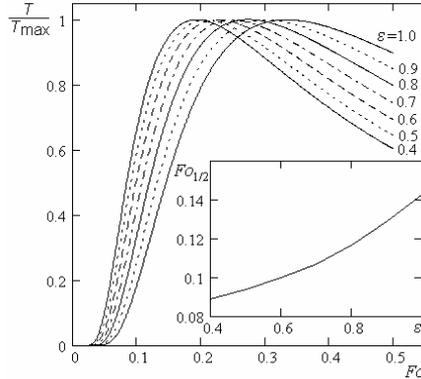
$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = \alpha T \quad (2)$$

определяется численным методом (метод конечных разностей).

Тогда уравнение (1) запишется

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{a\Delta t} = \frac{1}{r_i} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta r} + \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta r^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta z^2}.$$

Для устойчивости выбранной схемы в расчетах принимали соотношение  $a\Delta t/\Delta r^2 = 0,125$ . На рис. 2 приведены результаты численного расчета временного распределения температуры на поверхности эллипсоида при разных значениях эксцентриситета  $\varepsilon = R'/R$ . Данные зависимости выражены через приведенную температуру  $T/T_{\max}$  и безразмерное время – критерий Фурье  $Fo = at/R^2$ .



**Рис. 2** Зависимость относительной температуры от относительного времени, при разных значениях эксцентриситета  $\varepsilon$ .

**Зависимость  $Fo_{1/2}$  от  $\varepsilon$**

Рассмотренная данная тепловая модель позволяет определять значение теплопроводности в ходе эксперимента из соотношения

$$a = Fo_{1/2} \frac{R^2}{t_{1/2}},$$

где критерий Фурье  $Fo_{1/2}$ , является функцией  $\varepsilon$  (рис. 2),  $t_{1/2}$  – время, за которое температурный сигнал достигает половины максимального значения.

На результат измерений может повлиять длительность теплового импульса. Нами проведены оценочные расчеты влияния длительности импульса  $\tau_i$  на форму температурного сигнала. Для этого импульс аппроксимировали треугольником симметричной формы. Температуру рассчитывали по формуле

$$T'(t; \tau_i) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^{\tau_i} T(t - \tau) F(t - \tau) \Phi(t - \tau) d\tau,$$

где  $\Phi(t)$  – функция Хевисайда;  $T(t)$  – температура для мгновенного источника, в расчетах использовали функцию распределения температуры в неограниченном теле;  $F(t)$  – функция описывает форму треугольного импульса

$$F(t) = \begin{cases} \frac{4}{\tau_i} t & , 0 \leq t \leq \frac{\tau_i}{2} \\ 4 - \frac{4}{\tau_i} t & , \frac{\tau_i}{2} < t \leq \tau_i. \end{cases}$$

Результаты показали, что при соотношении  $\tau_i/t_{1/2} < 0,1$  погрешность в измерении теплопроводности меньше 1 %.

Для апробации работы проведены тестовые измерения теплопроводности в окрестности точки плавления олова, результаты исследований дают удовлетворительные результаты в сравнении с известными литературными данными. Также были изучены аномалии теплопроводности в окрестности температуры фазового перехода у системы Fe-Sn.

Погрешность измерений не превышает 5 %.

### Список литературы

1 Бузилов С.В. Импульсный метод измерения температуропроводности сферических образцов / С.В. Бузилов, Л.Д. Загребин // ИФЖ. 1999. Т.72, № 2. С. 236 – 239.

2 Загребин Л.Д. Измерение температуропроводности и теплопроводности металлов вблизи точки плавления / Л.Д. Загребин, С.В. Бузилов // ПТЭ. 2003. № 1. С. 153 – 157.

*Д.А. Дмитриев, П.А. Федюнин, В.А. Тетушкин*

**Тамбовский ВАИИ,  
Тамбовский государственный технический университет**

## **ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИИ**

В настоящее время композитные материалы защитных и противорадиолокационных покрытий находят широкое применение. Эти обстоятельства ставят неотложные задачи по созданию эффективных методов и средств контроля качества данных материалов и изделий на их основе как в готовом виде, так и в технологическом процессе производства.

Важными технологическими параметрами, которые необходимо контролировать, являются такие, как влажность всех компонентов, вязкость, кинетика твердения, плотность материала на всех стадиях его изготовления, наличие различных дефектов и т.п.

Наиболее универсальными и информативными являются бесконтактные радиоволновые методы, которые позволяют контролировать влажность, вязкость, кинетику твердения, геометрические размеры, содержание компонент, наличие различных дефектов, ориентацию наполнителя и другие параметры, что подтверждает актуальность разработки неразрушающего термовлагодетрического метода определения влажности поверхностного слоя  $W_n$  и интегральной влажности  $W$  по объему взаимодействия.

*Цель работы:* разработка неразрушающего СВЧ способа контроля влажности твердых материалов и устройства для его реализации.

Проведенный нами анализ микроволновых методов определения влажности позволил выявить основные их недостатки и сделать следующие выводы.

Резонаторный метод [1] за счет локализации поля в полости резонатора обладает достаточно высокой чувствительностью, а также создается возможность измерения влагосодержания образцов малой массы. Однако, по существу метод не является неразрушающим, так как требует изготовления образца строгой формы и размера, который помещается в полость объемного резонатора (ОР), не позволяет контролировать влажность изделий больших размеров, необходимость в настройке при изменении геометрических размеров ОР или волновода, вызванных изменением температуры окружающей среды, сложность процесса, а в некоторых случаях и невозможность непрерывных измерений влажности, применение поляризационных фильтров вырождения колебаний снижает добротность основного типа колебания и усложняет конструкцию первичного измерительного преобразователя (ПИП).

В СВЧ способе определения влажности твердых образцов [2], основанном на измерении в свободном пространстве затухания или фазового сдвига проходящей через контролируемый материал волны, мерой влажности исследуемого материала является ослабление мощности прошедшего сигнала в децибелах или изменение их фазы. В качестве недостатков способа следует отметить то, что точность измерений в данном случае зависит от толщины исследуемого образца и плотности материала, кроме того, данному способу присуща низкая чувствительность и сложность определения влажности малой массы, большое рассеивание СВЧ энергии.

СВЧ-способ определения влажности [1] твердых материалов по углу Брюстера, который заключается в нахождении угла падения электромагнитной волны на поверхность контролируемого материала и при котором существует минимум отраженной горизонтально-поляризованной электромагнитной волны от плоской поверхности образца, наиболее широко применяется для контроля влагосодержания твердых материалов в технологическом цикле их производства. Недостатками способа являются зависимость точности измерений от толщины исследуемого образца, исследуются только поверхностные слои материала, что исключает возможность получения информации об его интегральной влажности, точность измерений влажности зависит от состояния и характера отражающих поверхностей и, наконец, низкая точность измерений больших значений влажности.

Таким образом, учитывая все вышеперечисленные недостатки, нами разработан одноапертурный микроволновой термовлагодетекторный метод контроля влажности полимерных материалов, твердых большеразмерных изделий из строительных материалов, таких как бетон разных марок (в соответствии с ТУ диапазон изменения объемной влажности  $W \in (0,05 \dots 0,3 \%)$ ), керамика, гипсоблоки, силикатный кирпич и т.д.

На рис.1 показана структурная схема СВЧ термовлагомера, позволяющего измерять поверхностную влажность материала  $W_{\text{п}}$  и среднюю по объему взаимодействия материала с полем преломленной волны влажность  $W$ , где цифрами обозначены: 1 – блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ) «0» «Шеелит» и УВ-40:  $P_{\text{вых}} \cong 100$  Вт в непрерывном режиме,  $(f_{\text{min}} \dots f_{\text{max}}) \in (5,5 \dots 6,5)$  ГГц,  $\Delta f_{\text{д}} \leq 0,5$  ГГц – диапазон управляемой девиации частоты; 2 – управляемый микропроцессором (МП) аттенюатор на подмагниченном феррите; 3 – СВЧ – термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на МП (через МП управление и стабилизация  $P_{\text{вых}}$ ); 4 – диодный импульсный модулятор; 5 – генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором; 6 – пиковый детектор; 7 – волноводный  $Y$  – циркулятор; 8 – поглощающая согласованная нагрузка; 9 – кольцевая переменнo-фазная многощелевая антенна – излучающая часть комплексной апертуры; 10 – рупорная приемная часть комплексной апертуры; 11 – вентиль; 12 – СВЧ – термисторный ваттметр; 13 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отраженной волны  $P_{\text{отр}}$  по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «0»1 ( $E_{\Lambda 2}$  – Кл 5); 14 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 15 – счетчик ВИ, сопряженный с цифровым волномером 16; 17 – резонаторный датчик волномера; 18 – микропроцессор; 19 – блок термопар (ТП); 20 – персональный компьютер – РС.

Условно все объекты измерений можно разделить по соотношению их толщины  $b$  к длине волны генератора  $\lambda_{\text{Г}}$  на: а)  $b \ll \lambda_{\text{Г}}$  («квазистационарное» апертурное приближение); б)  $b \approx \lambda_{\text{Г}}$  («резонансное» приближение); в)  $b \gg \lambda_{\text{Г}}$  («оптическое» приближение). При этом прочие геометрические размеры должны быть много больше размеров эффективного раскрытия апертуры.

Эти соотношения во многом определяют вид и конструкцию согласованной излучающей апертуры и режим работы управляемого генератора СВЧ, его мощность, аппаратное и метрологическое обеспечение измерения влажности  $W$ .

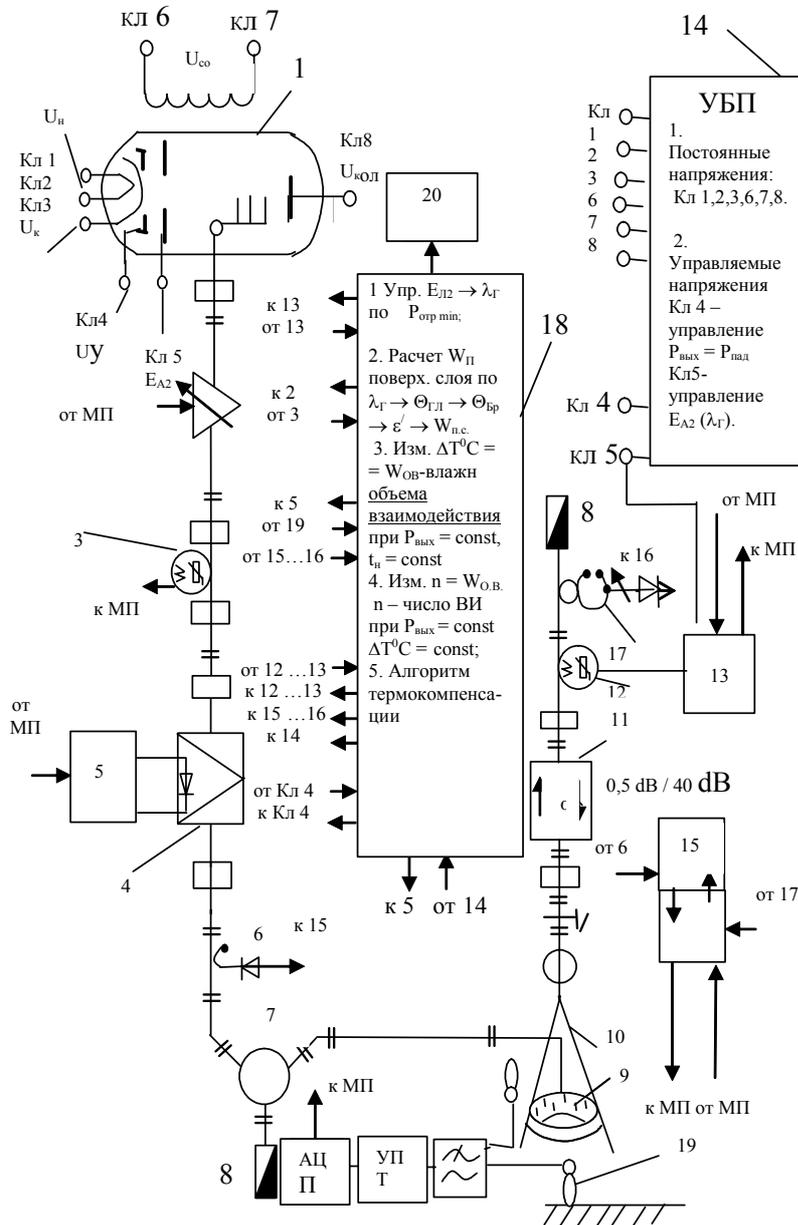


Рис. 1 Структурная схема СВЧ термовлагомера

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь к поверхности изделия, обеспечивая минимум облучения окружающей среды, контакт с поверхностью имеет лишь терморпный преобразователь (батарея терморпар), причем, степень прижима преобразователя должна быть максимально возможная.

Для реализации термовлагометрического метода нами разработана односторонняя апертура, которая позволяет обеспечить максимум переноса СВЧ энергии падающей волны именно в материал и минимума отражений и рассеивания энергии в окружающее пространство, а также повышение локальности измерения объемной влажности  $W$ .

Обеспечение угла падения ЭМВ на поверхность постоянно под углом полного преломления при изменении измеряемой  $W_{II}$  обеспечивает максимум  $P_{\text{прелом}}$  волны, энергия которой, нагревая объем взаимодействия, обеспечивает измерение интегральной величины влажности  $W$  средней по объему взаимодействия.

При реализации основного алгоритма измерений определяется изменение температуры поверхности фиксируемое блоком ТП 19 (батарея терморпар)  $\Delta T (^{\circ}\text{C}) = \Phi (W)$ . Время нагрева материала  $t_n(\text{сек}) = \text{const}$ ; мощность падающей волны  $P_{\text{пад}} = \text{const}$ . Так как  $\epsilon'' = \Phi (W)$ , т.е.  $P_{\text{пад}} = \Phi (W)$ , необходимо через измерение  $\epsilon'_{\text{см}}$  по углу Брюстера, корректировать (стабилизировать)  $P_{\text{пад}}$  или время нагрева так, чтобы количество энергии было  $P_{\text{прелом}} \cdot t_n = Q = \text{const}$ , следующим образом: измеряют величины минимальной отраженной мощности  $P_{\text{отр. min}}$  и падающей волны  $P_{\text{пад}}$ ; вычисляют мощность преломленной волны  $P_{\text{прелом}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр. min}}$  и изменяя величину  $P_{\text{пад}}$ , стабилизируют  $P_{\text{прелом}}$ .

Измеренная  $\Delta T$

$$\Delta T = \frac{P_{\text{прелом}} t_{\text{н}}}{C_V(W) \rho(W) V_{\text{вз}}(W)} = \frac{Q}{C_V(W) \rho(W) V_{\text{вз}}(W)}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{вз}}(W) = S_{\text{э}}(W_{\text{п}}) \cdot l_{\text{э}}(W) \approx S_{\text{ап}}(W_{\text{п}}) \cdot l_{\text{э}}(W)$  – переменный объем взаимодействия (объем нагрева).  
Или

$$\Delta T = \frac{K_5(W)^{\frac{1}{2}}}{C_V(W) \rho(W) S_{\text{ап}}(W_{\text{п}}) \lambda_{\text{г}}(W_{\text{п}})} = \Phi(W) \quad (2)$$

Здесь  $S_{\text{ап}}(W_{\text{п}}) \lambda_{\text{г}}(W_{\text{п}}) = \text{const} = K_6$  – величина  $K_6$  фиксируется при измерении  $W_{\text{п}}$ .

Уменьшение чувствительности в зоне больших влажностей  $W$  объясняется увеличением величины  $\varepsilon''$ , и соответственно  $|\dot{\varepsilon}|$ , при этом уменьшается величина  $l_{\text{э}}(V_{\text{э}})$ , что приводит к уменьшению количества тепла  $Q$ , так как затухание волны в материале прямопропорционально  $l_{\text{э}} [1]$

$$A, \partial B = 19,36 \frac{\ell_{\text{э}}}{\lambda_{\text{г}}} \sqrt{\varepsilon'(W_{\text{п}}) (\sqrt{\text{tg}^2 \delta + 1} - 1)}, \quad (3)$$

где  $\text{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(W)}{\varepsilon'(W_{\text{п}})}$ ; или по [4]

$$A = \kappa WR(W) = \kappa W \rho(W) l_{\text{э}}(W),$$

где  $R(W)$  – массовая толщина слоя материала.

К этому же выводу приводит [5] анализ выражения мощности поглощаемой  $1 \text{ м}^3$  в  $1 \text{ с}$  энергии активных поляризационных потерь

$$P_{\text{прелом}} = \frac{\omega}{2} \varepsilon \varepsilon''(W) \left( \frac{E}{\varepsilon'(W_{\text{п}})} \right)^2,$$

т.е. величина  $P_{\text{прелом}}$  уменьшается с ростом  $\varepsilon'(W)$  быстрее, чем с ростом  $\varepsilon''(W)$ .

Кроме основного алгоритма измерений с целью увеличения чувствительности измерения влажности  $W$  по объему взаимодействия в устройстве возможна реализация и дополнительного импульсного алгоритма измерений. Сущность его состоит в импульсно-непрерывной работе излучателя и преобразователей:

- модуляция СВЧ – излучения ВИ (видеоимпульсами) с  $\tau_{\text{н}} = \text{const}$ . при постоянной и большой мощности излучения  $P_{\text{изл}} = \text{const}$ ;

- величина  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) задается и фиксируется;

- число РИ (радиоимпульсов)  $n$  нагрева по достижении заданной  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) есть мера влажности  $W$ .

Таким образом, разработанный неразрушающий СВЧ способ контроля влажности твердых материалов позволяет, не разрушая капиллярно-пористый материал, отдельно определять влажность поверхностного слоя  $W_{\text{п}}$  и влажность по переменному объему взаимодействия  $W$  в пределах их изменения  $5 \dots 30 \%$  с точностью не хуже  $5 \%$ .

#### Список литературы

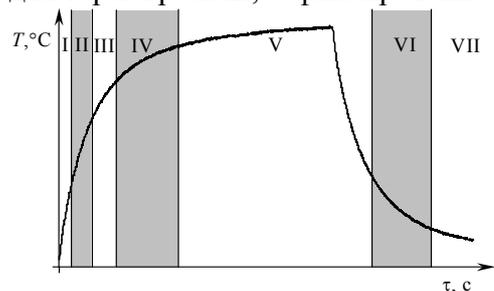
- 1 Берлинер М.А. Измерение влажности / М.А. Берлинер. М.: Энергия, 1973. 398 с.
- 2 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: 2-е изд., перераб. и доп. В 2 т. / Под. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. Т. 1. 392 с.
- 3 Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов. / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Сов. Радио, 1972. 430 с.
- 4 Берлинер М.А. Характеристики влагомеров сверхвысоких частот // М.А. Берлинер, В.А. Иванов // Приборы и системы управления. 1967. № 3.
- 5 Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых сыпучих материалов / Е.С. Кричевский. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.

**Н.П. Жуков**

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик (НК ТФХ) предусматривает тепловое воздействие на исследуемое тело с равномерным начальным температурным распределением. Тепловое воздействие осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде диска радиусом  $R$ , встроенного в измерительный зонд. Начальное температурное распределение контролируется несколькими термопарами одновременно (например, тремя). Фиксируется избыточная температура  $T$  в центре нагревателя и на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от центра.

На каждой термограмме, зафиксированной при нагреве и остывании, можно выделить несколько участков, соответствующих различным состояниям температурного поля исследуемой системы. Так, для термограммы, зафиксированной центральной термопарой, характерны семь участков (рис. 1).



**Рис. 1** Термограмма с выделенными

**рабочими участками**

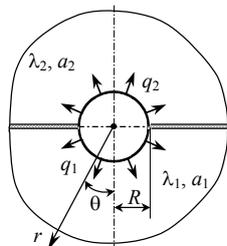
Первому участку термограммы соответствует одномерное температурное поле в исследуемом теле (образце). Тепловые потоки, поступающие в образец ( $q_1$ ) и зонд ( $q_2$ ) (рис. 2), изменяются во времени, так как между нагревателем и образцом имеет

ся термическое сопротивление и нагреватель обладает инерционностью. Второму участку термограммы отвечает температурное поле, близкое к одномерному, но процесс проходит стадию регуляризации [1]. Третьему участку термограммы соответствует двухмерное температурное поле в образце, поскольку нельзя пренебречь распространением тепла в радиальном направлении.

Четвертому участку термограммы соответствует тепловой процесс, вышедший на стадию регуляризации. В исследуемом образце формируется полусферическое одномерное температурное поле.

На пятом участке термограммы нарушаются условия полуограниченности исследуемого тела.

После отключения нагревателя, на стадии остывания, можно выделить шестой участок термограммы, тепловой процесс в котором проходит стадию регуляризации, и седьмой участок, где тепловой процесс изменяется.



**Рис. 2** Тепловая схема системы зонд-образец с поверхностным сферическим нагревателем

Участки термограммы II, IV и VI – рабочие, так как возможно однозначно определить значения теплофизических характеристик (тепловой активности –  $\epsilon$ , теплопроводности –  $\lambda$ , температуропроводности –  $a$  и теплоемкости –  $c$ ) в зависимости от параметров аналитических моделей, описывающих термограмму на данных температурно-временных интервалах, используя регулярные тепловые режимы на моделях плоского и сферического полупространств [1].

Расчетные уравнения, описывающие термограмму на II и IV участках, получены на основании решений соответствующих краевых задач. Применение данных решений в методе НК ТФХ детально изложено в работе [1].

Рис. 2 Тепловая схема системы зонд-образец с поверхностным сферическим нагревателем

После отключения нагревателя, на стадии остывания, можно выделить шестой участок термограммы, тепловой процесс в котором проходит стадию регуляризации, и седьмой участок, где тепловой процесс изменяется.

Расчетное уравнение, описывающее термограмму на VI участке, получено на основе решения краевой задачи, которая формулируется следующим образом.

Тепловая система представляет собой два полуограниченных тела (рис. 2) с различными ТФХ. На полусферических поверхностях тел действует источник тепла постоянной мощности. Тепловой источник действует в течение заданного интервала времени, затем отключается и система остывает.

Математически данная задача записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \tau} &= a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1(r, \theta, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \right) \right), \\ &\left( r > R, 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}, \tau > 0 \right); \\ \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \tau} &= a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2(r, \theta, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \right) \right), \\ &\left( r > R, \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi, \tau > 0 \right); \\ T_1(r, \theta, 0) \Big|_{\substack{r \geq R \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}}} &= f(r), \quad T_2(r, \theta, 0) \Big|_{\substack{r \geq R \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi}} = f(r); \\ T_1(\infty, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}}} &= T_2(\infty, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi}} = 0, \quad T_1(R, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}}} = T_2(R, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi}}, \\ \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \frac{\pi}{2} - 0 \\ r > R \\ \tau > 0}} &= \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \frac{\pi}{2} + 0 \\ r > R \\ \tau > 0}} = 0, \quad \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = 0 \\ r > R \\ \tau > 0}} = \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \pi \\ r > R \\ \tau > 0}} = 0, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1(R, \theta, \tau)}{\partial r} \Big|_{\substack{0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \\ \tau > 0}} &= 0, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2(R, \theta, \tau)}{\partial r} \Big|_{\substack{\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \\ \tau > 0}} = 0, \quad \tau > 0. \end{aligned}$$

где  $f(r)$  – функция начального распределения температуры в каждом полуограниченном теле;

$$f(r) = \frac{qR^2}{(\lambda_1 + \lambda_2)r}, \quad \tau - \text{время.}$$

Решение задачи для первого тела имеет вид

$$T_1(r, \tau) = \frac{qR^3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r\sqrt{\pi}(\lambda_1 + \lambda_2)^2} \left( \frac{(r-R)(\lambda_1 + \lambda_2)}{\sqrt{a_1}R(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} + 1 \right) \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad r > R, \quad \tau > 0, \quad \left( 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \right).$$

$$\text{При } r = R: \quad T_1(R, \tau) = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)qR^2}{(\lambda_1 + \lambda_2)^2\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad \tau > 0, \quad \left( 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \right).$$

Полученные решения описывают термограммы на рабочих участках вне зон структурных превращений и используются в методе неразрушающего теплофизического контроля твердых материалов [1, 2].

## Список литературы

1 Мищенко С.В. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 112 с.

2 Пат. 2167412 РФ. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов, Н.Ф. Майникова, В.В. Орлов // БИ 2001. № 14.

*А.Д. Ивлиев, С.В. Анахов, В.В. Мориллов,  
А.В. Шульгин*

Российский государственный профессионально-педагогический  
университет (Екатеринбург)

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОГО ЖЕЛЕЗА АРМКО МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

Температуропроводность является важным теплофизическим свойством вещества. Действительно, параметры нестационарных тепловых процессов определяются именно этим кинетическим коэффициентом. Известно, что роль нестационарных процессов в современных технологиях возрастает по мере роста температуры. Поэтому особую актуальность приобретают средства измерения, способные оценивать температуропроводность веществ при высоких температурах в твердом и жидком состояниях.

Способ исследования температуропроводности, предложенный нами [1], основан на методе температурных волн. Идея метода пояснена на рис. 1. Модулированный по периодическому закону тепловой поток  $q(t)$  воздействует на открытую горизонтальную поверхность конденсированного образца 1, находящегося в тигле. Этот тепловой поток вызывает периодические изменения температуры поверхности образца, которые распространяются по образцу в виде температурной волны.

Фотоэлектрический датчик, расположенный в измерительном устройстве 2, преобразует колебания температуры центральной области поверхности образца в электрический сигнал. Для оценки температуропроводности исследуемого вещества измерительное устройство измеряет сдвиг фазы колебаний температуры по отношению к

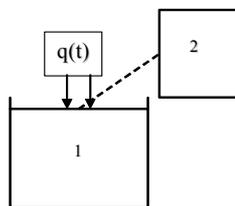


Рис. 1

фазе колебаний теплового потока, воздействующего на образец. Методика расчета температуропроводности описана в [2].

Следует отметить, что в нашем методе воздействие теплового потока и процесс измерения температуры происходят непосредственно на поверхности образца, минуя стенки каких-либо контейнеров, содержащих исследуемое вещество. Другие подобные исследования нам не известны.

В нашей установке в качестве источника теплового потока, создающего температурные волны, используется оптический квантовый генератор ЛГН-701 (длина волны 10,6 мкм, мощность 60 Вт). Его излучение, пройдя механический модулятор, через оптический вакуумный ввод попадает в вакуумную камеру и воздействует на поверхность образца. Частота модуляции (частота температурной волны) при измерении свойств жидких металлов выбирается в пределах 0,5 ... 10 Гц.

Средняя температура образца изменяется при помощи специального нагревателя – электропечи сопротивления. Измерение средней температуры производится при помощи термопары ВР5/20, расположенной за пределами образца вблизи центральной части его открытой поверхности. Максимальная температура, создаваемая в рабочей зоне, 2300 К. В вакуумной камере создается разрежение до  $10^{-3}$  Па.

Обычно, при исследовании жидких металлов для подавления их испарения в камеру после откачки запускается благородный газ гелий с избыточным давлением  $10^5$  Па.

Измерительные устройства 2 (рис. 1) используются двух типов. Во-первых, находит применение аналоговый следящий измеритель фазы и амплитуды (СИФА) низкочастотных синусоидальных сигналов [3], который обладает высокими чувствительностью и помехоустойчивостью. Его недостатком является снижение качества работы на низких частотах рабочего диапазона. Во-вторых, используется цифровой измеритель параметров сигналов [4]. Его работа отличается высокой стабильностью, но несколько меньшей чувствительностью по сравнению с СИФА.

В работе исследовался образец стандартного вещества – железа армко. Алундовый тигель, в котором находился образец, имел диаметр 17 мм и высоту 20 мм. Измерения температуропроводности носили относительный характер, поскольку в этом случае обеспечивалась меньшая погрешность [2]. Привязка результатов относительных измерений к абсолютным значениям производилась по имеющимся данным для высокотемпературной области чистого железа [5]. Результирующая средняя квадратическая погрешность измерения температуропроводности не превышала 7 % при разрешающей способности 5,2 %.

Результаты исследования показали, что процесс плавления железа не сопровождается существенным изменением температуропроводности (область температур, непосредственно примыкающая к температуре плавления, не рассматривается, поскольку в этой области наблюдаются аномальные изменения температуропроводности). Дальнейшее повышение температуры сопровождается некоторым ростом этой физической величины. Такой ход политермы температуропроводности находится в согласии (в соответствии с законом Видемана-Франца) с известными данными о температурной зависимости удельного электросопротивления железа [5]. Вместе с тем, подобный тип температурной зависимости находит свое объяснение и в рамках микроскопических моделей проводимости переходных металлов.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали достаточную надежность прямого метода исследования температуропроводности жидких металлов.

### Список литературы

- 1 А.с. 1603271. Способ измерения коэффициента температуропроводности материалов: / А.Д. Ивлиев, А.А. Куриченко, А.Н. Поздеев, В.В. Морилов. Оpubл. БИ № 40 от 30.10.90.
- 2 Морилов В.В. Измерение коэффициента температуропроводности материалов / В.В. Морилов, А.Д. Ивлиев, А.Н. Поздеев // ИФЖ. 1993. Т. 64, № 1. С. 73 – 74.
- 3 Куриченко А.А. Экспериментальная установка для исследования температуропроводности и относительной теплоемкости материалов в твердой фазе при высоких температурах / А.А. Куриченко, А.Д. Ивлиев, В.Е. Зиновьев; Свердловск: Свердл. горн. ин-т, 1985. 60 с. Деп. в ВИНТИ 19.02.85. № 7993–85 // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24, № 2. С. 412.
- 4 Ивлиев А.Д. Цифровой измеритель в экспериментальной установке для исследования теплофизических свойств веществ методом температурных волн / А.Д. Ивлиев, А.А. Куриченко, О.Б. Лунегов, А.В. Волков // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой международной теплофизической школы (24–28 сент. 2001 г.) / ТГТУ. Тамбов, 2001. Ч. 2. С. 21 – 22.
- 5 Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. Металлургия, 1989. 384 с.

*Н. Ф. Майникова*

Тамбовский государственный технический университет

### ОБ ОДНОМ РЕШЕНИИ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Известные решения краевых задач теплопроводности стефановского типа сложны для реализации в методах неразрушающего контроля (НК) структурных превращений (фазовых, релаксационных) в полимерных материалах [1, 2]. Указанные обстоятельства требуют поиска новых моделей и их решений, пригодных к использованию при НК структурных превращений.

Разработанный метод НК включает: тепловое воздействие на участок поверхности исследуемого полимерного тела от плоского круглого источника тепла постоянной мощности, встроенного в измерительный зонд; одновременное фиксирование температурных откликов в заданных точках поверхности тела; пошаговую обработку термограмм по разработанным алгоритмам с помощью измерительно-вычислительной системы; фиксирование аномалий теплофизических характеристик (ТФХ) на температурных зависимостях [3].

Распространение тепла в твердых полуограниченных телах от плоского круглого нагревателя постоянной мощности, расположенного в плоскости их контакта, с учетом тепловых эффектов возможных структурных превращений в одном из тел, описывается следующей системой дифференциальных уравнений

(с соответствующими начальными и граничными условиями):

$$\frac{\partial T_1(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_1(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T_1(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + \frac{F_{\text{п}}(r, z, \tau)}{c\rho},$$

$$(\tau > 0, z > 0, r \geq 0);$$

$$\frac{\partial T_2(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_2(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T_2(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right), (\tau > 0, z < 0, r \geq 0),$$

где  $a_1, a_2$  – температуропроводности первого и второго тела;  $c\rho$  – удельная объемная теплоемкость, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время;  $r, z$  – пространственные координаты;  $F_{\text{п}}$  – количество поглощаемого или выделяемого тепла в единицу времени в единице объема исследуемого полимерного тела при структурном переходе. Функция  $F_{\text{п}}$  зависит от величины теплового эффекта структурного превращения.

Определить распределения температурных полей в данной системе в любой момент времени с учетом теплового эффекта структурного превращения в исследуемом теле затруднительно, вследствие нелинейности задачи.

В основе метода лежат следующие предположения.

1 На термограмме имеются участки (рабочие), для которых вне зоны структурного превращения обеспечивается высокая точность совпадения результатов вычислительных экспериментов по аналитическим моделям с экспериментальными данными. Рабочим участкам соответствуют тепловые режимы опыта, вышедшие на стадии регуляризации [3].

2 ТФХ исследуемого материала до и после структурного превращения различаются несущественно в температурном интервале, соответствующем рабочему участку термограммы.

3 Структурные превращения, сопровождающиеся тепловыми эффектами, проявляются на экспериментальных термограммах и могут быть выявлены в виде отклонений от аналитических моделей.

Метод НК структурных превращений предусматривает выделение на термограммах нескольких участков, которые достаточно точно описываются аналитическими зависимостями, полученными при решении краевых задач теплопроводности с учетом ТФХ материалов, контактных сопротивлений и теплоемкостей элементов устройства и др. факторов. Метод применен на моделях плоского и сферического полупространств, как на стадии нагрева, так и на стадии остывания [3]. Рассмотрим постановку и решение одной из таких задач.

Известно, что распределение температурного поля в исследуемом теле от плоского круглого источника тепла постоянной мощности радиуса  $R_{\text{п}}$  при  $\tau \gg 0$  близко к распределению температурного поля в сферическом полупространстве со сферической полостью радиуса  $R$ , через которую осуществляется заданное тепловое воздействие с тем же тепловым потоком. Расчетное уравнение, описывающее термограмму на рабочем участке вне зоны структурного превращения, получено решением следующей краевой задачи.

Два полуограниченных тела с различными ТФХ находятся в идеальном тепловом контакте с поверхностным сферическим источником тепла постоянной мощности радиуса  $R$  и плотностью теплового потока  $q^* = q_1 + q_2$  при температуре  $T(r, \theta, 0) = 0$ . Вне сферы, в плоскости соприкосновения двух тел, существует тонкая идеальная теплоизоляция. Математически данная задача записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1(r, \theta, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \right) \right), \quad (1)$$

$$\left( r > R, 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}, \tau > 0 \right);$$

$$\frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2(r, \theta, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \right) \right), \quad (2)$$

$$\left( r > R, \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi, \tau > 0 \right);$$

$$T_1(r, \theta, 0) \Big|_{\substack{r \geq R \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}}} = 0, \quad T_2(r, \theta, 0) \Big|_{\substack{r \geq R \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi}} = 0;$$

$$T_1(\infty, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}}} = T_2(\infty, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi}} = 0,$$

$$T_1(R, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}}} = T_2(R, \theta, \tau) \Big|_{\substack{\tau > 0 \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi}},$$

$$\frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \frac{\pi}{2} \\ r > R \\ \tau > 0}} = \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \frac{\pi}{2} \\ r > R \\ \tau > 0}} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_1(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = 0 \\ r > R \\ \tau > 0}} = \frac{\partial T_2(r, \theta, \tau)}{\partial \theta} \Big|_{\substack{\theta = \pi \\ r > R \\ \tau > 0}} = 0,$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, \theta, \tau)}{\partial r} \Big|_{\substack{\theta = 0 \\ 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}}} = q_1, \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2(R, \theta, \tau)}{\partial r} \Big|_{\substack{\theta = \pi \\ \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi}} = q_2, \quad \tau > 0.$$

В предположении, что градиент температуры в каждом из рассматриваемых полуограниченных тел не зависит от координаты  $\theta$ , и с учетом условия (3) при соотношении тепловых потоков  $2q^* = q$  [1, 2] получаем задачу, эквивалентную приведенной выше. Уравнения (1) и (2) с соответствующими начальными и граничными условиями запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad r > R, \quad \tau > 0, \quad \left( 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \right);$$

$$\frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial r} \right),$$

$$r > R, \quad \tau > 0, \quad \left( \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \right).$$

Решение задачи для первого тела имеет вид

$$T_1(r, \tau) = - \left( \frac{qR^2(r-R)}{\sqrt{\pi} \sqrt{a_1} r (\lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{qR^3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\sqrt{\pi} r (\lambda_1 + \lambda_2)^2} \right) \frac{1}{\sqrt{\tau}} + \frac{qR^2}{(\lambda_1 + \lambda_2)r}, \quad (4)$$

$$r > R, \quad \tau > 0, \quad \left( 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \right),$$

где  $\lambda_1, \varepsilon_1, \lambda_2, \varepsilon_2$  – соответственно теплопроводности и тепловые активности первого и второго тел.

При равенстве тепловых потоков от моделируемых круглого и поверхностного сферического источников тепла (при определенном соотношении их радиусов) уравнение (4) адекватно реальному тепловому процессу вне зоны структурного превращения на определенном временном интервале. Решение (4) может быть использовано в методе НК структурных превращений полимеров [3].

#### Список литературы

- 1 Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов; Под ред. А.Г. Шашкова. Мн.: Наука и техника, 1986. 392 с.
- 2 Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. М.: Высш. шк. 2001. 550 с.
- 3 Многомодельный метод неразрушающего теплофизического контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, А.С. Чех // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 2. Рубрика 01. Препринт 07. 36 с.

*С.В. Пономарев, С.Г. Толстых, М.П. Беляев*

Тамбовский государственный технический университет

### МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В данной работе приводятся основные итоги разработки метода и устройства для измерения коэффициента диффузии  $a_m$  капиллярно-пористых и дисперсных материалов.

Основные этапы работы включают в себя следующее.

На 1-м этапе разработан порядок проведения эксперимента, в котором образцы из исследуемого материала приводятся в плотное соприкосновение таким образом, чтобы при исследовании динамики изменения влагосодержания в одном из образцов обнаруживался экстремум, а регистрация времени его наступления не предъявляла требований к предварительной градуировке датчика влаги (достаточно знать, что его выходной сигнал монотонно зависит от влагосодержания).

На 2-м этапе разработана физическая модель проведения эксперимента и сформированы требования к расчетному модулю, позволяющему найти коэффициент диффузии по времени наступления максимального влагосодержания в одном из образцов.

На 3-м этапе разработана математическая модель, описывающая процесс проведения эксперимента, в ходе которого происходит диффузия влаги из более влажного образца в менее влажный при их контактировании.

На 4-м этапе разработаны эффективные алгоритмы и программы расчета влагосодержания в ходе проведения эксперимента. На их основе проводится исследование влияния параметров математической модели на ее выходные переменные, чтобы, во-первых, подтвердить непротиворечивость данных, полученных на ЭВМ, физической сущности моделируемых явлений, а, во-вторых, – выявить основные закономерности поведения расчетных величин в зависимости от параметров эксперимента.

На 5-м этапе разработаны расчетные зависимости, алгоритмы и программы, позволяющие находить коэффициент диффузии по времени наступления максимального влагосодержания.

На 6-м этапе проанализированы причины возникновения погрешностей измерения и выведены формулы для оценки частных погрешностей, возникающих в ходе проведения эксперимента и последующего за ним расчета коэффициента диффузии.

На 7-м этапе выведена формула для оценки общей погрешности косвенного измерения коэффициента диффузии. Эта формула понадобится на этапах метрологической оптимизации (этап № 10) и для оценки погрешности после проведения эксперимента (этап № 14).

На 8-м этапе проведено исследование частных погрешностей измерения как функций режимных и конструктивных параметров.

На 9-м этапе проведено исследование общей погрешности косвенного измерения коэффициента диффузии в зависимости от режимных и конструктивных параметров.

На 10-м этапе проведена метрологическая оптимизация, в результате которой мы находим оптимальные конструктивные и режимные параметры.

На 11-м этапе разработана конструкция измерительного устройства по результатам расчетов на предшествующих этапах и, в частности, по результатам метрологической оптимизации.

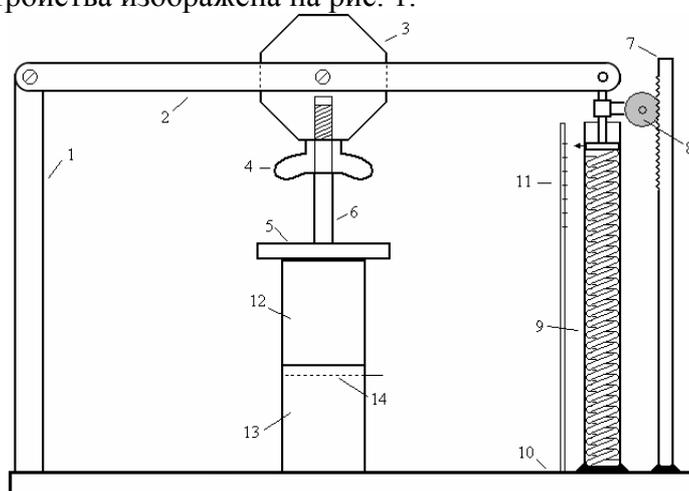
На 12-м этапе изготовлено измерительное устройство.

На 13-м этапе осуществлена проверка метода на образцах из древесины, проведено измерение коэффициентов диффузии.

На 14-м, заключительном, этапе проведена оценка точности полученных результатов.

Подробности реализации этапов 1–10 опубликованы нами в работах [1–3]. Ниже приводятся основные результаты выполнения работ на этапах 11–14.

Разработана конструкция измерительного устройства, предназначенного для осуществления экспериментов по определению коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах (КПМ). Принципиальная схема устройства изображена на рис. 1.



**Рис. 1** Принципиальная схема измерительного устройства

В нижней части устройства находится основание *10*, на нем крепятся: кронштейн *1*, пружинное устройство *9* и шкала прижимных усилий *11*. Подвижный кронштейн *2* приводится в движение устройством для фиксации и установки силы прижима, состоящим из зубчатого колеса *8*, которое может перемещаться по рейке *7* и, при необходимости, фиксировать прижимное усилие. В середине подвижного кронштейна *2* находится специальная шестигранная шайба, которая может свободно вращаться вокруг своей оси. Толщина шайбы должна быть достаточной для размещения в ней винтового соединения с осью *6*, посредством которой прижимное усилие передается на площадку *5* и на систему образцов *12*, *13*. Гайка *4* позволяет регулировать расстояние от нижней плоскости площадки *5* до основания *10* и, тем самым, использовать измерительное устройство для образцов разной геометрии. Прижимное усилие отображается на шкале *11*, что позволяет устанавливать одинаковую силу прижима в серии опытов. Образец № 2 (по физической модели [1]) обозначен на схеме числом *13*, в нем находится гальванопара *14*, подключенная к микровольтметру. Сверху от образца *13* находятся [1]: на первом этапе – образец № 1; на втором этапе – образец № 3.

Измерительное устройство использовалось нами для проведения серии экспериментов с образцами из ряда пород деревьев средней полосы России (см. табл. 1).

1 Результаты измерения коэффициента диффузии  $a_m$

	Осина	Сосна	Ива	Береза	Дуб
--	-------	-------	-----	--------	-----

$a_m \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{с}$	6,16	5,11	2,03	1,23	1,12
% ошибки	15,3	17,4	15,4	12,8	15,6

### Список литературы

- 1 Мищенко С.В. К вопросу о погрешностях измерения коэффициента диффузии пористых материалов / С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, С.Г. Толстых, С.С. Толстых // Вестник ТГТУ. Т. 9, № 2. С. 150 – 165.
- 2 Толстых С.Г. Оценка погрешности измерения коэффициента диффузии в капиллярно-пористых материалах / С.Г. Толстых, С.В. Пономарев // Деп. в ВИНТИ 21.04.04. № 670 – В2004.
- 3 Толстых С.Г. Метрологическая оптимизация параметров эксперимента по определению коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах / С.Г. Толстых, С.С. Толстых, С.В. Пономарев // Деп. в ВИНТИ 21.04.04. № 667 – В2004.

*М.М. Сафаров, З.В. Кобулиев, С.Г. Ризоев*

Таджикский технический университет (Душанбе)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теплопроводность и удельную теплоемкость сплавов алюминия измеряли на установках, разработанных профессором Е.С. Платуновым и его учениками, и изготовленных Актюбинским заводом (ИТЛ-400 и ИТС<sub>р</sub>-400). Подробная схема, методика измерения и расчет погрешности измеряемых величин представлены в работе [1].

Кроме того, для измерения температуропроводности, удельной теплоемкости и теплопроводности исследуемых сплавов алюминия нами собрана экспериментальная установка, работающая по импульсному методу [2] (Thermophysical Transient Tester. Model RT1.02).

С помощью предложенной установки можно за один опыт измерять три теплофизических свойства твердых тел в интервале температур 293...673 К.

Теория этого метода подробно приведена в работе (L.Kubicar: Pushse method of measuring basic thermophysical parametrs (Elsevier 1990)). С помощью этого метода можно определить теплофизические свойства стекла, сплавов, композиционных материалов, пористых и гранулированных материалов и др. [2].

Надо отметить, что данную методику измерения успешно использовали ученые из бывшего Советского Союза. Но в установках, разработанных Е.С. Платуновым, используется исследуемый, объект и основа (стержень), т.е. два разных объекта. Кроме того, прибор, изготовленный заводом г. Актюбинска измеряет теплопроводность и теплоемкость отдельно, и на основе этих данных рассчитывается температуропроводность исследуемых объектов.

В предложенной и собранной нами установке используются цилиндры, изготовленные из самого образца, размеры, которых подробно приводятся ниже. Требования, предъявляемые к установке и определяющие ее преимущества, следующие:

- 1 Процесс измерения происходит в малом промежутке времени.
- 2 В предложенной установке можно использовать только образцы, имеющие форму цилиндра или параллелепипеда.
- 3 В процессе измерения необходимо контролировать режим нагрева и неизменность структуры исследуемого объекта.
- 4 В процессе простого измерения временной зависимости разности температуры можно определить сразу три теплофизические характеристики.
- 5 Все процессы измерения можно автоматизировать.

Нагреватель, сделанный из тонкой металлической вольфрамовой нити, помещен между первой и второй частями образца, в то время как спай термпары вставляется между второй и третьей частью образца. В опыте импульс создается с помощью нагревателя (вольфрамовой фольги) кратковременно подключаемой к источнику тока.

Сплавы составляют большую группу двойных и многокомпонентных систем, получаемых обычно охлаждением жидкого расплава-смеси компонентов. Компонентами сплава могут быть отдельные элементы и их химические соединения (металлы, неметаллы, полупроводниковые соединения, окислы, соли и др.).

В данной установке нами измерены теплофизические свойства сплавов алюминия. Установлено, что теплофизические свойства сплавов алюминия с ростом температуры увеличиваются, что объясняется, во-первых, увеличением фонной теплопроводности; во-вторых, увеличением удельного сопротивления сплавов.

### Список литературы

- 1 Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. Л.: Энергия 1973. 143 с.
- 2 L. Kubcar Pulse method of measuring basic thermophysical parameters. (Elsevier. 1990).

*А.Ю. Сенкевич*

Тамбовский государственный технический университет

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ НАЧАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

В данной работе рассматривается задача определения теплофизических свойств (ТФС) образцов из твердых теплоизоляционных материалов без нарушения их целостности тепловым методом. Наиболее эффективным способом получения надежных и достоверных результатов теплофизического контроля является проведение определенного количества идентичных экспериментов. При проведении таких многократных измерений процесс контроля представляется совокупностью чередующихся стадий нагрева  $[\tau_0, \tau_1]$  и остывания  $[\tau_1, \tau_2]$  и их последовательного повторения.

На стадии остывания традиционно производится термостатирование, заключающееся в выравнивании температурных полей измерительного зонда и исследуемого образца до начального равномерного значения  $T_0$ . Значительная продолжительность данного процесса существенно сказывается на производительности и точности метода неразрушающего контроля (НК).

В разработанном нами многостадийном методе процесс контроля предлагается вести значительно быстрее, выбрав конечным моментом стадии остывания момент времени  $\tau_2^*$ , при котором в исследуемом образце сохраняется остаточное температурное поле от предыдущего нагрева. Возникающая при этом необходимость определения функции пространственного распределения температуры в образце и его учета в качестве начального в расчетных зависимостях метода для любой стадии предопределила выбор математической модели теплового процесса, схемы реализации нагрева и измерения температуры образца.

Создание в исследуемом образце сферического или полусферического температурного поля с центром на поверхности в месте расположения нагревателя в наибольшей степени отвечает поставленной задаче контроля ТФС без нарушения целостности образца, поскольку для нахождения вида этого поля и измерения его параметров не требуется внедрения термодатчиков вглубь исследуемого тела, а достаточно их размещения на его поверхности в плоскости контакта с зондом ( $z = 0$ ). Как показывают наши исследования, реализовать такое распределение на практике при определенных условиях возможно с использованием плоского нагревателя, имеющего форму круга небольшого диаметра.

Показано, что при больших временах ( $\tau \gg 0$ ) процесс распространения тепла в массивном теле, нагреваемом круглым плоским нагревателем постоянной мощности и радиусом  $R$ , будет мало различаться с тепловым процессом, протекающим в этом же теле, нагреваемом тем же тепловым потоком, но полусферической полостью радиусом  $R_c$ , расположенной в той же, что и круглый нагреватель, центральной части поверхности тела.

В этом случае в исследуемом образце формируется сферическое одномерное температурное поле, а задача определения вида и параметров начального распределения температуры решается посредством размещения в плоскости контакта  $z = 0$  термодатчиков и обработки их показаний при проведении эксперимента.

Заменой реального плоского круглого нагревателя радиусом  $R$ , воздействующего на исследуемый образец тепловым потоком постоянной плотности  $q$ , на эквивалентный полусферический нагреватель с соответствующими ему параметрами  $R_c$  и  $q_c$  приходим к следующей одномерной краевой задаче теплопроводности, адекватно описывающей процесс распространения тепла в рассматриваемом полуограниченном твердом теле:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (R_c \leq r < \infty, \quad \tau \geq 0); \quad (1)$$

- начальное условие  $T(r, 0) = f(r)$ , (2)

- граничные условия  $T(\infty, \tau) = 0$ ,

$$-\lambda \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial r} = q_c - c_n \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где  $T(r, \tau)$  – избыточная температура;  $a$  – температуропроводность;  $f(r)$  – функция начального распределения температуры в образце;  $\lambda$  – теплопроводность;  $c_n$  – теплоемкость нагревателя.

Методом интегрального преобразования Лапласа получено решение задачи (1) – (3) для поверхности полусферы  $r = R_c$

$$T(R_c, \tau) = \frac{q_c R_c}{\lambda} \left( 1 - \frac{R_c}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + I(\tau), \quad (4)$$

где первое слагаемое описывает изменение температуры под действием теплового потока поверхностной плотности  $q_c$ , а второе  $I(\tau)$  учитывает известное начальное распределение температуры.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований был установлен вид функции начального распределения температуры  $f(r)$  в исследуемом образце, параметры которой определяются на момент начала стадии нагрева  $\tau = \tau_2^*$  по показаниям датчиков температуры, расположенных только в плоскости  $z = 0$  контакта измерительного зонда с исследуемым образцом.

Для получения расчетных зависимостей метода на стадии нагрева выражение (4) запишем следующим образом:

$$\tilde{T}(R_c, \tau_c) = b_0 - b_1 \tau_c, \quad (5)$$

где  $\tilde{T}(R_c, \tau_c) = \tilde{T}(R_c, \tau) = T(R_c, \tau) - I(\tau); \quad b_0 = q_c R_c / \lambda;$   
 $b_1 = q_c R_c^2 / (\lambda \sqrt{\pi a}); \quad \tau_c = 1 / \sqrt{\tau}.$

Тогда, выделяя на экспериментальной термограмме участок (при  $\tau \gg 0$ ), описываемый линейной зависимостью (5), и определяя методом наименьших квадратов его параметры  $b_0$  и  $b_1$ , находятся искомые ТФС:

$$\lambda = \frac{q_c R_c}{b_0}; \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{\pi} \left( \frac{b_0}{b_1} R_c \right)^2, \quad (7)$$

где  $q_c$  и  $R_c$  являются реально измеряемыми постоянными характеристиками измерительного устройства и определяются при его градуировке.

Протекание теплового процесса в исследуемом теле после выключения нагревателя (стадия остывания –  $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2^*$ ) описывается следующей краевой задачей теплопроводности:

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

$$(0 \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad \tau \geq 0),$$

- начальное условие  $T(r, z, 0) = f(r, z);$  (9)

- граничные условия  $\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = 0$  и

$$T(r, z, \tau) \rightarrow 0 \quad \text{при } r^2 + z^2 \rightarrow \infty, \quad (10)$$

где  $f(r, z)$  – распределение температуры в образце на момент окончания стадии нагрева, являющееся начальным для рассматриваемой стадии остывания.

Решая задачу (8) – (10) методом двойных пространственно-временных интегральных преобразований Лапласа-Ханкеля, получено выражение для температуры в точке  $r = 0$  плоскости  $z = 0$  контакта измерительного зонда с исследуемым образцом

$$T(0, 0, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}(a\tau)^{3/2}} \int_0^\infty \int_0^\infty r \exp\left(-\frac{r^2 + z^2}{4a\tau}\right) f(r, z) dz dr, \quad (11)$$

которое с учетом начального распределения

$$f(r, z) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2 + z^2}{B_0}\right) \quad (12)$$

позволило получить формулу для независимого определения температуропроводности на стадии остывания

$$a = \frac{B_0}{4\tau} \left[ \left( \frac{A_0}{T(0, 0, \tau)} \right)^{2/3} - 1 \right]. \quad (13)$$

Использование закономерностей процесса остывания твердого тела для определения его температуропроводности  $a$  позволяет проводить коррекцию результатов контроля ТФС на стадии нагрева в случае возникновения случайных промахов и ошибок и тем самым повышает производительность многократных измерений.

***В.Н. Чернышов<sup>1</sup>, В.М. Фокин<sup>2</sup>***

Тамбовский государственный технический университет (1),  
Волгоградский государственный  
архитектурно-строительный университет (2)

### **НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду, существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты строительных объектов. Для решения этих задач нужно знать теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, тепловую активность материалов. На некоторые изделия и материалы паспортные данные есть, на другие – нет. Кроме того, фактические характеристики строительных материалов и изделий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать их сертификату или паспорту. Поэтому при возведении объектов различного назначения в ходе строительства при их производстве и эксплуатации необходимо уметь определять теплофизические характеристики (ТФХ) материалов и изделий. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалах позволяет вскрыть природу веществ, корректно проводить тепловые расчеты технологических процессов и выбирать оптимальные варианты расчета и эксплуатации.

Кардинальный ответ на запросы техники – развитие методов расчета и прогнозирования теплофизических характеристик на основе фундаментальных научных обобщений. Несмотря на определенные успехи в этом направлении, методы предсказания свойств пока еще должного развития не получили и главным источником информации остается эксперимент. Важнейшим условием повышения эффектив-

ности эксперимента является высокая производительность всего цикла измерений, включая монтаж и демонтаж образцов. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов испытания материалов и изделий, которые практически позволяют оценить качество продукции и ее влияние на энергосбережение.

Наиболее полную информацию о ТФХ исследуемых материалов и изделий содержит температурное поле, определяемое из решения краевых задач теплопроводности для соответствующих тепловых воздействий и условий проведения теплофизического эксперимента. Для создания математических моделей тепловых процессов в физических объектах или исследуемых образцах необходимо определение температурного поля в объекте при различных видах теплового воздействия на его поверхность. При этом вид и режим теплового воздействия, форму нагревателя и условия проведения эксперимента выбирают таким, чтобы с помощью несложных математических зависимостей адекватно описать физику процесса.

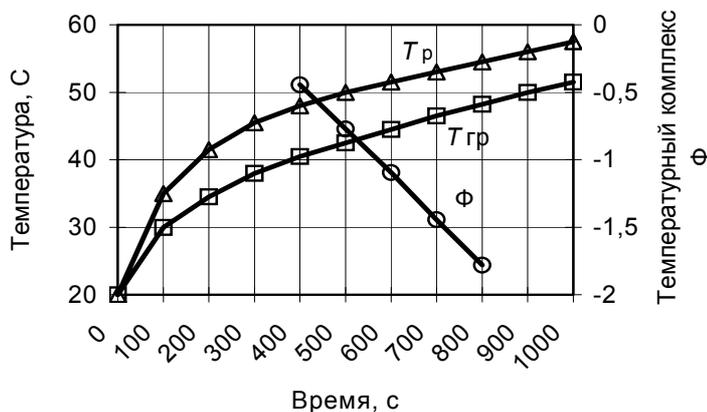
В работе доказано, что при симметричном нагреве призмы квадратного сечения конвективным, лучистым или суммарным потоком тепла процессы распространения тепла могут быть описаны совокупностью уравнений, решение которых позволили получить аналитические зависимости в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины (константы),

$$\Phi = \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.} \quad (1)$$

Полученное выражение является закономерностью упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения при любых симметричных условиях теплообмена на границе. Закономерность упорядоченного теплового режима (1) не лимитируется параметрами и физическими переменными внешней среды. При ее практическом использовании нет необходимости измерять температуру окружающей среды или поддерживать ее постоянной. В структуру закономерности не входят такие физические характеристики, как коэффициент теплообмена, степень черноты и др. Температура окружающей среды может изменяться во времени.

Наибольший интерес представляют точки на поверхности призмы квадратного сечения – середины грани и ребра призмы. В этом случае отпадает необходимость проникать с термопарой вглубь образца, что имеет особое практическое значение и возможность использования контактных термопар. Для проведения опытов методом неразрушающего контроля и для измерения температуры ребра и середины грани на призме квадратного сечения разработано устройство с использованием контактных термопар.

Подготовленные к опыту образцы (призмы квадратного сечения) с контактными термопарами помещали в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали в установке за счет конвекции и радиации одновременно. На рис. 1 приведены результаты экспериментального распределения температур ребра  $T_p$  и середины грани  $T_{гр}$  при нагревании призмы квадратного сечения ( $2R = 0,05$  м) из красного кирпича воздушно – сухой влажности плотностью  $\rho = 1700$  кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 1 Нагрев призмы квадратного сечения из красного кирпича**

**воздушно-сухой влажности,  $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$ ,  $2R = 0,05 \text{ м}$ ,**

$T_{гр}$  – температура середины грани;  $T_p$  – температура ребра;

$\Phi$  – температурный комплекс, вычисленный по формуле (2)

Температурный комплекс  $\Phi$  вычисляется по измеренным во времени температурам  $T_p$  – ребра и  $T_{гр}$  – середины грани:

$$\Phi = \ln(T_p - T_{гр}) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_p - T_{гр}}. \quad (2)$$

В результате усреднения полученного углового коэффициента  $\Delta\Phi/\Delta\tau$  прямой линии  $\Phi$  определяется значение коэффициента температуропроводности  $a$  материала по формуле

$$a = (R^2 / 4,94) \cdot (\Delta\Phi/\Delta\tau),$$

где  $R$  – расстояние между термопарами, установленными на исследуемом образце;  $\Phi$  – температурный комплекс, определяемый на основе закономерности упорядоченного теплового режима;  $\Delta\Phi/\Delta\tau$  – угловой коэффициент прямой линии в области упорядоченного теплового режима.

В результате серии экспериментов при нагревании призмы квадратного сечения из красного кирпича ( $2R = 50 \text{ мм}$ ) получили следующие усредненное значение коэффициента температуропроводности  $a = 0,393 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . По данным НИИ Стройфизики у красного кирпича плотностью  $1700 \text{ кг/м}^3$  и влажностью 2 % коэффициент температуропроводности составляет  $a = 0,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Разработанный метод выгодно отличаются от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью. Кроме того, метод позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, при этом упрощается реализация на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов, в технической теплофизике, строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

Стеновые доклады

*М.П. Беляев*

Тамбовский государственный технический университет

## **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассматривается задача определения коэффициента диффузии влаги в листовых капиллярно-пористых материалах, например, бумаги. Недостатками известных способов является необходимость разрушения исследуемых изделий, а также градуировки применяемых измерительных преобразователей влажности по каждому материалу, что существенно снижает оперативность контроля.

В предлагаемом техническом решении исследуемый листовый материал с равномерным начальным распределением влаги (в том числе и нулевым) помещают на плоскую подложку не смачиваемого водой материала, например, фторопласта.

К поверхности образца прижимается зонд с импульсным точечным источником массы и расположенными на concentрических окружностях от источника электродами гальванического преобразователя (ГП). После подачи импульса влаги (мгновенного увлажнения точки поверхности образца) фиксируют изменение ЭДС ГП во времени. ЭДС такого преобразователя определяется энергией связи влаги с материалом, контактирующим с поверхностями его электродов, которая в конечном итоге однозначно связана с влагосодержанием материала именно на concentрической окружности радиуса  $r_0$  с центром в точке увлажнения материала, что позволяет определить коэффициент диффузии влаги непосредственно из кривых изменения ЭДС ГП без проведения предварительной градуировки, что существенно повышает оперативность исследований.

*М.П. Беляев*

Тамбовский государственный технический университет

## **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОПИТКИ МАССИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Появление значительного количества новых пропиточных составов, например, для противопожарной и противогрибковой обработки древесины, вызывает необходимость разработки средств для оперативного контроля эффективности их проникновения в обрабатываемый материал, которые определяются коэффициентом диффузии пропиточного состава.

Предлагается способ оперативного неразрушающего контроля коэффициента диффузии растворяющих в изделиях, имеющих плоскую поверхность.

К поверхности изделия, имеющего равномерное начальное распределение состава (как правило, нулевое) прижимается зонд с импульсным линейным источником массы и расположенными на заданных расстояниях от источника электродами гальванического преобразователя (ГП). После подачи импульса массы (нанесения пропиточного состава вдоль прямой линии на поверхности изделия) фиксируют изменение ЭДС ГП во времени. ЭДС такого преобразователя определяется энергией связи пропиточного состава с обрабатываемым материалом, контактирующим с поверхностями его электродов. Это позволяет определить коэффициент диффузии пропиточного состава из решения задачи массопереноса от импульсного линейного источника в неограниченной среде.

Расчетные формулы получены на основе кривых изменения не концентрации распределенного вещества в капиллярно-пористом теле (что связано со значительной трудоемкостью проведения предварительных исследований), а изменения ЭДС ГП, что существенно повышает оперативность исследований.

*Л.А. Ведешкина, А.Н. Дрязгов, С.С. Хануни*

Тамбовский государственный технический университет

## **КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД**

## С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА\*

Производство новых готовых продуктов на основе переработки промышленных отходов – одно из направлений интенсификации производств.

Мелассу, являющуюся отходом свеклосахарного производства, используют в качестве основного сырья для получения этилового спирта. При высокой концентрации сухих веществ (СВ) меласса не сбраживается, поэтому обеззараженную мелассу разводят водой, добавляя при этом питательные вещества. Брожению подвергаются только сахара, а определить их содержание в растворе мелассы традиционными методами затруднительно (наличие волокон, пузырьков газа), т.е. возможен анализ содержания сахаров только химическими методами в условиях лаборатории.

Производство же спирта из мелассы – непрерывный процесс, поэтому контролировать концентрацию СВ в растворе мелассы необходимо постоянно. Контроль предлагается осуществлять при помощи метода ламинарного режима.

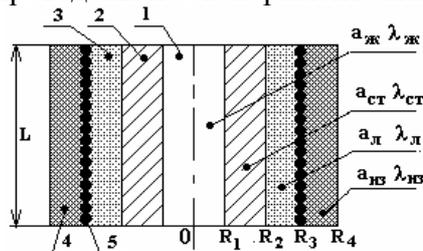
При изменении концентрации сухих веществ в технологических потоках изменяются теплофизические характеристики (ТФХ) проходящей через измерительную трубку жидкости а, следовательно, распределение температурного поля вдоль трубки при ламинарном потоке пограничного слоя.

Теплофизическая характеристика, заслуживающая наибольшего внимания – теплоемкость, так как проведенный анализ литературы показал, что наиболее выражена зависимость теплоемкости раствора сахарозы от ее концентрации.

Необходимо также оценить степень влияния примесей растворов мелассы на результаты измерений теплофизических характеристик раствора.

Эту задачу можно решить путем экспериментального исследования нескольких веществ: воды; растворов мелассы и сахарного сиропа с одинаковыми плотностями из диапазона (1100-1240 [кг/м<sup>3</sup>]). Указанные исследования были проведены на экспериментальной установке.

Измерительную трубку (рис. 1) длиной  $L$  с протекающей по ней жидкостью можно представить как цилиндрическую многослойную систему, состоящую из собственно раствора мелассы 1, протекающей по трубке 2, покрытой слоем лака 3, теплоизоляции 4, нагревателя 5. Каждый из



**Рис. 1** Схема представления измерительной трубки, как многослойной системы

указанных слоев имеет свои ТФХ (температуропроводность  $a$ , теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ ).

При протекании раствора вверх по трубке происходит его нагревание. По изменению температур стенки и раствора на выходе из трубки можно судить о его концентрации.

Полученные результаты обработаны при помощи программного обеспечения, разработанного на кафедре.

Полученные зависимости дают возможность определения концентрации растворов по их ТФС.

*А.Г. Воронков, В.П. Ярцев*

Тамбовский государственный технический университет

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. С.В. Пономарева

В последнее время широкое применение в строительстве находят защитно-конструкционные эпоксидные растворы. Благодаря высокой адгезии к различным материалам их используют при устройстве бесстыковых стыков (ж/б свай, колонн), усилении, ремонте строительных конструкций и др.

Работоспособность эпоксидных растворов в адгезионных соединениях в значительной степени определяется их теплофизическими характеристиками. Так, при контакте материалов, имеющих различные значения термического расширения, повышение температуры эксплуатации, как правило, приводит к возникновению значительных внутренних напряжений в адгезионном шве, что может служить причиной его разрушения. Кроме того, следует учитывать резкую температурную зависимость деформационно-прочностных свойств полимеррастворов.

В связи с этим представляет интерес исследовать влияние вида и количества наполнителя на теплофизические свойства эпоксидных растворов (температуру стеклования  $T_c$  и коэффициент линейного термического расширения  $\alpha$ ). В качестве объектов исследования были выбраны: связующее – эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20, три вида наполнителей (отходы промышленных производств) – керамзитовая крошка ( $d = 0,14 \dots 1,25$  мм,  $\rho_n = 1000$  кг/м<sup>3</sup>), асбофрикционные отходы (АФО) ( $d = 4 \dots 12$  мкм,  $\rho_n = 750$  кг/м<sup>3</sup>,  $S_y = 4000 \dots 4500$  см<sup>2</sup>/г), минераловатная крошка ( $l = 2 \dots 7$  мм,  $\rho_n = 75$  кг/м<sup>3</sup>). Отверждение композиций проводили полиэтиленполиамином (ПЭПА) при комнатной температуре и атмосферном давлении. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

1 Влияние вида и количества наполнителя на теплофизические характеристики эпоксиполимера ЭД-20

Состав композиции, масс. %		$T_c, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1 \cdot 10^6, \text{град}^{-1}$ *	$\alpha_2 \cdot 10^6, \text{град}^{-1}$ **
ЭД-20		51	88,0	127,9
ЭД-20	АФО	14	57	70,2
		28	59	70,2
	керамзитовая крошка	27	56	69,9
		48	65	44,5
	минераловатная крошка	5	57	74,0
		12	63	66,1

Примечание: \* – ниже  $T_c$ , \*\* – выше  $T_c$ .

Как видно из таблицы, введение наполнителей приводит к повышению температуры стеклования  $T_c$  эпоксидного полимера. Это объясняется тем, что при отверждении происходит структурное ориентирование полимера в граничном слое на поверхности наполнителя, а также образуются напряженные мостики макромолекул между частицами наполнителя, вызывающие эффект сшивания полимера [1]. В то же время происходит снижение значений коэффициента  $\alpha$  выше и ниже  $T_c$  (табл. 1).

Наибольшее увеличение  $T_c$  наблюдается при введении керамзитовой крошки, что, видимо, связано с большими размерами частиц (по сравнению с АФО) и особенностями структуры поверхности наполнителя.

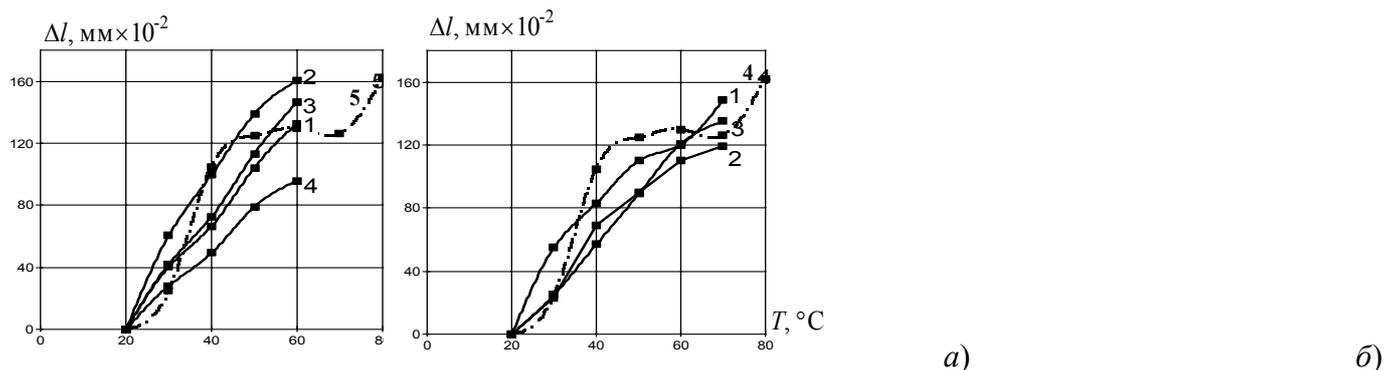
Таким образом, наполнение положительно сказывается на теплофизических характеристиках эпоксидных композитов. При разработке составов полимеррастворов предпочтение следует отдавать наполнителям с развитой шероховатой поверхностью, обеспечивающей надежную адгезию полимера к наполнителю [2].

### Список литературы

- Чернин П.З. Эпоксидные полимеры и композиции / П.З. Чернин, Ф.М. Смехов. М.: Химия, 1982. 232 с.
- Воронков А.Г. Разработка эпоксидных композитов с использованием отходов промышленности / А.Г. Воронков, В.П. Ярцев // Проблемы и пути создания композиционных материалов из отходов промышленности / СибГИУ. Новокузнецк, 2003. С. 26 – 33.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИТУМА

В строительстве широко используются битумы и материалы на их основе. Модификация битумов различными добавками существенно влияет на их теплофизические свойства. В данной работе исследовали битум с добавками утилизируемых отходов: керамзитовой крошки, древесных стружки и муки. Отходы вводили в битум марки БН 90/10 в количестве 10 – 50 масс. %. Создание надежных и эффективно работающих строительных композиций на основе битума и отходов промышленности невозможно без изучения вопросов их долговечности и теплостойкости.



**Рис. 1** Дилатометрические кривые для

*а* – чистого битума (5) и наполненного 20 масс. % керамзита фракций: 0 ... 0,315 (1); 0,315 ... 0,63 (2); 0,63 ... 1,25 (3), 0 ... 2,5 (4);  
*б* – чистого битума (4) и наполненного 10 масс. % древесной стружки (1); 10 масс. % древесной муки (2) и 20 масс. % древесной муки (3)

Для всех полученных композиций на приборе «кольцо и шар» определяли температуру размягчения, которая характеризует теплостойкость битума (см. табл. 1). Из таблицы видно, что при увеличении количества добавок температура размягчения не меняется.

**1** Величины теплофизических и механических характеристик наполненного битума

Вид наполнителя	-	Древесные отходы			Отходы керамзита, размер фракции, мм							
		стружка	мука		0...0,315	0,315...0,63	0,63...1,25	0...2,5				
Количество наполнителя, масс. %	0	10	10	20	20	50	20	50	20	50	20	50
Температура размягчения, °С	90	86	92	95	88	90	90	91	87	89	89	91
Коэффициент термич. расширения α, °С <sup>-1</sup>	14	5	6	6	7	6	8	4	8	4	6	6

Коэффициент термического расширения  $\alpha$  определяли на лабораторном оптическом dilatометре в интервале температур 20...100 °С. Dilатометрические кривые, представленные на рисунке, наглядно отражают процессы, происходящие в битуме и битумных композициях при нагревании. Характер зависимостей различен для битума и всех исследуемых битумных материалов. Чистый битум при нагревании до 40...50 °С начинает размягчаться (достигает начальной температуры размягчения); при 75...80 °С температурного расширения битума не происходит ( $\alpha = 0$ ), т.е. весь объем материала переходит в пластическое состояние; увеличение температуры ( $T > 80$  °С) приводит к расширению полностью размягченного битума. Для всех наполненных битумов зависимости заметно спрямляются. Очевидно, что введение наполнителей приводит к увеличению жесткости композиций. Из табл. 1 видно, что введение керамзитовой крошки и древесных отходов до 20 масс. % снижает  $\alpha$  в 2–2,5 раза, а до 50 масс.% более, чем в 3 раза.

*О.С. Дмитриев, С.В. Мищенко, А.О. Дмитриев*

Тамбовский государственный технический университет

## **МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ КОМПОЗИТОВ**

При расчете и оптимизации режимных параметров технологического процесса производства толстостенных изделий из полимерных композитов на основе связующих горячего отверждения методами вакуумного автоклавного формования и горячего прессования необходимо учитывать изменение толщины изделия за счет вытекания связующего под технологическим давлением перпендикулярно или параллельно слоям наполнителя.

Уравнения течения, моделирующие массоперенос при отверждении связующего, содержат реологические характеристики системы связующее-наполнитель: энергию активации вязкого течения  $E_{\mu}$ , эффективную или структурную составляющую вязкости связующего при отверждении  $\tilde{\mu}(\beta)$ , а также характеристики наполнителя, зависящие от направления течения связующего; при горячем прессовании и течении вдоль волокон – это коэффициент формы зазоров между слоями волокон наполнителя  $B$ , при вакуумном формовании и течении перпендикулярно волокнам – коэффициент проницаемости наполнителя  $k_{\text{ТК}}$  или впитывающего материала  $k_{\text{вс}}$ .

Из приведенных характеристик  $\tilde{\mu}(\beta)$  является функцией степени отверждения, три других ( $E_{\square}$ ,  $k_{\text{ТК}}$ ,  $k_{\text{вс}}$ ) константами, причем энергия активации вязкого течения  $E_{\square}$  является осредненным значением функции  $E_{\square}(t(\square))$ .

Реологические характеристики  $E_{\square}$  и  $\tilde{\mu}(\beta)$  определяются из системы двух уравнений по данным изменения толщины  $L(t)$ , измеренной при отверждении образцов из одного и того же исследуемого материала по двум различным температурно-временным режимам  $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ .

Формулы для определения  $\tilde{\mu}(\beta)$  содержат неизвестные константы  $B$  и  $k$ , которые могут быть определены дополнительными исследованиями с помощью специального оборудования. В случае отсутствия необходимости знания значений структурной составляющей вязкости связующего при отверждении можно определить некоторые комплексы, включающие в себя структурную составляющую вязкости связующего  $\tilde{\mu}(\beta)$  и коэффициент проницаемости  $k$  при исследовании течения перпендикулярно волокнам или коэффициент формы зазоров между слоями волокон наполнителя  $B$ , если исследуется течение вдоль волокон.

В основу алгоритмов и программ обработки экспериментальных данных положены расчетные формулы определения и реологических характеристик.

Алгоритмы расчета реологических характеристик  $E_{\square}$  и  $\tilde{\mu}(\beta)$  заключаются в пересчете временной зависимости толщины  $L_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) на единую сетку аргумента – степень отверждения  $\square_{1j}$ , т.е.  $L_i(t_i(\square_{1j}(t_1)))$  ( $i = 1, 2, \dots$ ).

Особенностью алгоритмов расчета реологических характеристик являются операции дифференцирования и интегрирования. Дифференцирование  $L(t)$  по времени  $t$  выполняется сглаживающим сплайном при пересчете  $L(t)$  и ее производной на сетку  $\square_{1j}(t)$ . Интегралы в формулах расчета энергии актива-

ции вязкого течения  $E_{\square}$ , вследствие случайных погрешностей измерения и вычислительных погрешностей расчета подинтегральных функций, вычисляются на основе аппроксимации подинтегральной функции сглаживающим сплайном с последующим аналитическим интегрированием полученной сплайн-функции.

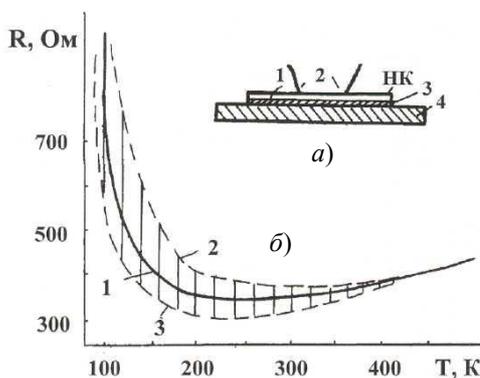
*А.П. Ермаков, С.А. Ермаков, А.И. Дрожжин*

Воронежский государственный технический университет

## МИКРОМОДУЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНОГО КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ

Нитевидные кристаллы (НК) имеют высокую удельную прочность, миниатюрные размеры и малую тепловую инерцию. Поэтому НК кремния являются перспективными при использовании в качестве преобразователей пульсирующих и быстроменяющихся температур. Преобразователь температуры выполнен в виде измерительного микро модуля, схема которого приведена на рис. 1, а. Микро модуль – это НК 1 с токовыводами 2, закрепленный клеем 3 на подложку 4. Соотношение параметров НК, клея и подложки приводят к вариации свойств микро модуля. Поэтому исследование электрических свойств измерительного микро модуля на основе НК  $p\text{ Si } \langle 111 \rangle$  представляет как научный, так и практический интерес.

Для экспериментов НК разделяется на две равные части, к каждой из которых изготавливаются контакты на некотором расстоянии от торцов НК для исключения краевого эффекта. Одна часть НК является контрольной, вторая является основой для создания измерительного микро модуля.



**Рис. 1** Схема микро модуля (а) и его зависимости  $R(T)$  (б)

Типичные зависимости  $R(T)$  ненаклеенного (кривая 1) и наклеенного (кривые 2, 3) НК Si на твердотельную подложку приведены на рис. 1б. Зависимости  $R(T)$  существенно различаются. Это связано с тем, что при нагреве наклеенного тензорезистора, в процессе полимеризации клея, возникшие в микро модуле напряжения, обусловленные «кажущейся» деформацией из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов подложки ( $\beta_n$ ) и НК ( $\beta_k$ ), успевают релаксировать. Поэтому полимеризация клея заканчивается в отсутствие напряжений. При нагреве выше или охлаждении ниже температуры полимеризации клея (точка пересечения кривых 1 и 2), из-за различия  $\beta_n$  и  $\beta_k$  возникает «кажущаяся» деформация, а следовательно, появляется и тензорезистивный эффект.

На электросопротивление микро модуля (рис. 1а) оказывают влияние: место расположения электрических контактов 2, геометрические размеры НК 1, а также параметры клея 3 и подложки 4. Ввиду того, что температурный коэффициент сопротивления (ТКС) микро модуля ( $\alpha_m$ ) с наклеенным НК выше, чем ненаклеенного ( $\alpha_k$ ), то в термометрии тензорезистивный эффект играет положительную роль. Это важно при разработке преобразователей температуры, имеющих защитные покрытия либо при создании микро модулей преобразователей температуры жидкостей, газов и поверхности твердых тел. Напротив, в тензометрии тензорезистивный эффект вносит ошибку в измерения и требуется принимать меры к его ослаблению. Результаты исследований  $R(T)$  при прочих равных условиях (рис. 1б), ненаклеенного (1) и наклеенного (2, 3) терморезисторов заметно отличаются друг от друга. Температурные участки с отрицательным и положительным значениями ТКС для ненаклеенного и наклеенного терморезисторов не

совпадают друг с другом. Различие зависимостей  $R(T)$  объясняется тензорезистивным эффектом и наблюдается при использовании подложек из композиционных материалов, эбонита, графита, металлов. Наибольшее проявление тензорезистивного эффекта наблюдается при 77 К. С увеличением температуры кривые 2, 3 и 1 сначала монотонно приближаются, а затем пересекаются друг с другом. Точка пересечения кривых 1 и 2, 3 находится в области положительного значения ТКС и соответствует температуре полимеризации клея.

*С.А. Ермаков, А.П. Ермаков, А.И. Дрожжин*

Воронежский государственный технический университет

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНОГО КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ

Применение нитевидных кристаллов (НК) в измерительной технике в качестве миниатюрных и особо прочных электронных преобразователей температуры и скорости потока газов представляется перспективным благодаря высокому совершенству структуры, высокой механической прочности и малым геометрическим размерам в сочетании с удобной формой.

В первичном преобразователе использовался НК кремния р-типа проводимости с ориентацией оси роста  $\langle 111 \rangle$  и удельным сопротивлением  $\sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$  Ом·м, имеющий диаметр 15...40 мкм и длину 2...5 мм. Омические контакты к НК кремния изготавливали микроточечной электронной сваркой Pt-микропроволоки диаметром 15...25 мкм, либо с помощью ультразвука Al-микропроволоки диаметром 27 мкм. В режиме измерения температуры, текущий через НК ток не превышал  $\sim 10^{-4}$  А и не приводил к разогреву преобразователя выше исследуемой температуры  $T_0$  окружающей среды. Погрешность измерения температуры не превышала  $\sim 0,1\%$ .

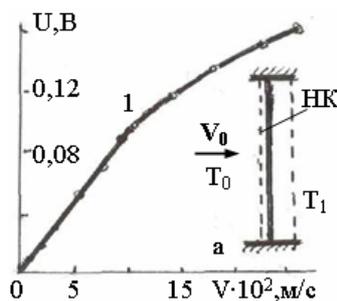
В режиме термоанемометра

используется электрический ток более  $\sim 10^{-3}$  А, который нитевидный преобразователь разогревал до температуры  $T_1$  выше температуры  $T_0$  (рис. 1, а) окружающей среды. Ось роста НК  $\langle 111 \rangle$  ориентировалась перпендикулярно скорости  $V_0$ , набегающего потока газа (рис. 1, а). В спокойном воздухе тепловое поле перегрева было симметрично относительно

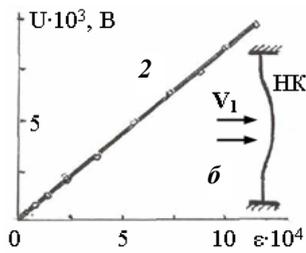
НК. В режиме термоанемометра деформация, и чем больше скорость потока, тем больше деформировалось тепловое поле разогретого НК. Поэтому, в режиме термоанемометра, в зависимости от величины рабочего тока разогрева НК, измеряемые скорости потока ограничены в диапазоне 1...400 мм/с (кривая 1).

Ввиду удачного сочетания малого объема и большой свободной поверхности НК значение теплоемкости и тепловой инерции для преобразователей на основе НК кремния, в десятки и сотни раз меньше, чем для промышленных терморезисторов. Это позволяет измерять ими скорости потоков газа от 1 мм/с и изучать динамику быстропротекающих тепловых процессов, изменение температуры и скорости потоков газов в микрообъеме  $\sim 10^{-11} \dots 10^{-12}$  м<sup>3</sup>.

Сочетание в НК р Si  $\langle 111 \rangle$  высокого значения напряжения прочности (400 ... 500 кГ/мм<sup>2</sup>) и коэффициента тензочувствительности ( $K \sim 80$ -



**Рис. 1** Схема (а) и зависимость  $U(V)$  (1) в режиме термоанемометра



**Рис. 2** Схема (б) и зависимость  $U(\epsilon)$  (2) в использовании тензoeffекта

разователь включают в измерительную электрическую цепь в режиме использования тензорезистивного эффекта («тензоанемометр»), оставив ориентацию оси роста НК  $p$  Si  $\langle 111 \rangle$  ортогонально вектору скорости  $V_1$  потока газа, как показано на рис. 2, б. В потоке НК упруго деформируется, что и позволяет измерять скорости  $V_1$  потока газа в диапазоне от 0,2 м/с и выше вплоть до скоростей, приводящих к разрушению НК.

Наиболее замечательной особенностью НК является то, что они представляют собой самую прочную из всех известных разновидностей форм твердого тела. Последнее дает основание сделать вывод о том, что измерители скорости потока газа на основе НК  $p$  Si  $\langle 111 \rangle$  не имеют себе равных и являются уникальными.

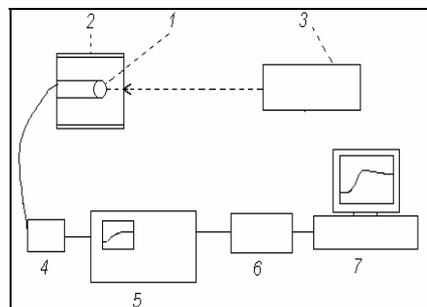
*Л.Д. Загребин, О.Е. Каракулов, С.В. Бузилов*

Ижевский государственный технический университет

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУФЕРНОЙ ПАМЯТИ. ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ ОЛОВА В ЖЕЛЕЗЕ

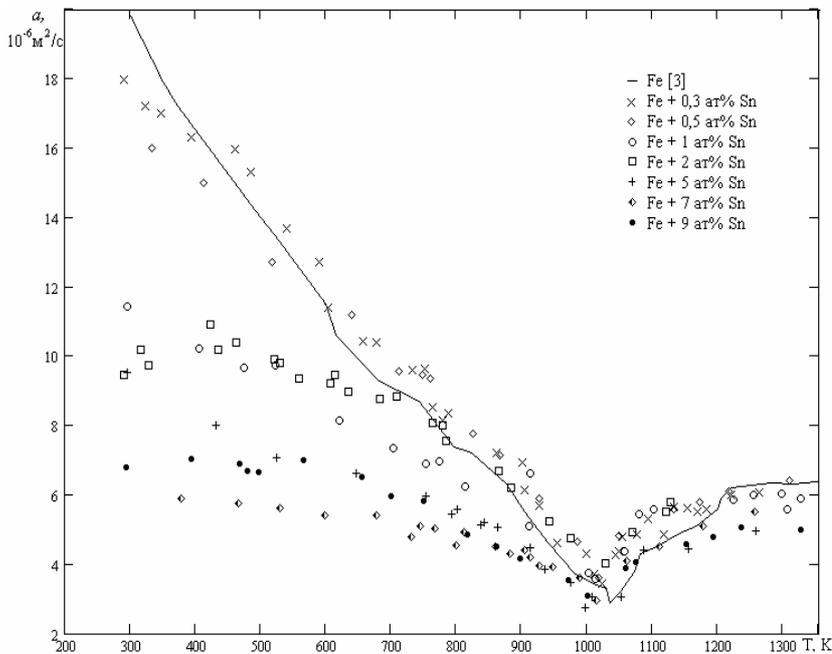
Одним из самых существенных узлов современной экспериментальной установки, как для регистрации, так и для обработки данных, является компьютер, но при этом часто не учитываются помехи, возникающие при его работе. Главной особенностью данной автоматизированной системы для исследования теплофизических свойств веществ, основанной на работе [1], является наличие буферной памяти. То есть измерения проводятся при выключенном компьютере, затем информацию можно считать и провести обработку данных эксперимента. Блок-схема измерительной системы приведена на рис. 1, где 1 – образец, 2 – вакуумная печь, 3 – импульсный лазер ГОР 100, 4 – предварительный усилитель, 5 – цифровой осциллограф, 6 – блок усилителей-АЦП [2], 7 – персональный компьютер.

На данной измерительной системе были проведены исследования температурной зависимости теплопроводности твердых растворов олова в железе. Теплопроводность определялась импульсным методом в температурном интервале 295 ... 1350 К.



**Рис. 1** Блок-схема измерительной установки

На рис. 2 представлены результаты измерения теплопроводности для образцов Fe + 0,3; 0,5; 1; 2; 5; 7 и 9 ат % Sn.



**Рис. 2 Температурные зависимости температуропроводности**

Температуропроводность чистого железа имеет большой отрицательный коэффициент до точки Кюри ( $T_c$ ) вблизи которой наблюдается хорошо выраженный минимум [3]. Как видно из рисунка, температуропроводность образцов вплоть до системы с содержанием 9 ат% Sn качественно ведет себя подобным же образом. С увеличением концентрации металлоида значение температуропроводности уменьшается, минимум сглаживается и смещается в сторону уменьшения температуры. Кроме того, видно, что минимальное значение температуропроводности с ростом концентрации металлоида вначале увеличивается, затем уменьшается, принимая минимальное значение при концентрации металлоида 5 ат %.

#### Список литературы

- 1 Перевозчиков С.М. Автоматизированная система измерения теплофизических параметров металлов и сплавов / С.М. Перевозчиков, Л.Д. Загребин // ПТЭ. 1998. № 3. С. 155 – 158.
- 2 Каракулов О.Е. Универсальный аппаратно-программный комплекс для регистрации и предварительной обработки сигналов датчиков при определении теплофизических свойств материалов / О.Е. Каракулов, Л.Д. Загребин // ПТЭ. 2003. № 5. С. 164 – 166.
- 3 Загребин Л.Д., Ивлиев А.Д., Шабанова И.Н., Терехова Н.С., Куриченко А.А., Полев В. Ф. // ФММ. 2002. Т. 94, № 4, С. 31 – 36.

*И.В. Ковалева, И.В. Кораблев, Ю.И. Азима*

Московский государственный университет инженерной экологии  
Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЫ УРАВНЕНИЯ ФУРЬЕ

Представлены теоретические основы и техническая реализация метода измерения теплопроводности низкотеплопроводных материалов.

Согласно теории метода объект исследования в виде полубесконечного тела подвергается импульсному тепловому воздействию от плоского, распределенного источника произвольной формы (в частности, прямоугольной или круглой). Измеряются температуры в двух точках  $t(x_1, y_1, \tau) = t_1(\tau)$ ,  $t(x_2, y_2, \tau) =$

$t_2(\tau)$ , удельное количество теплоты  $Q(T)$ , поступившее в образец за время измерения  $T$  и реализуется условие

$$t(x, y, 0) = t(x, y, T). \quad (1)$$

Получение формулы для определения теплопроводности базируется на преобразовании дифференциального уравнения Фурье в сферических координатах в интегральную форму [1] с представлением распределенного источника тепла в виде совокупности идеальных точечных источника. В результате имеем:

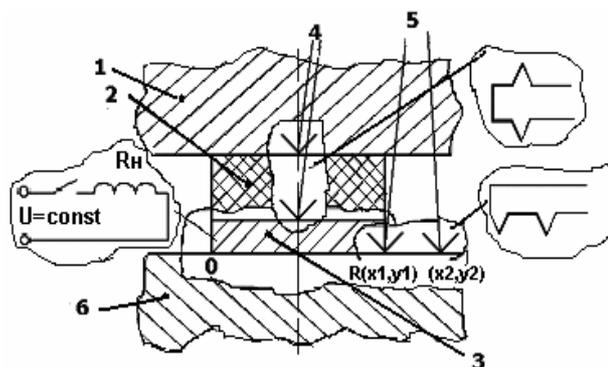
$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \int_0^L \int_0^R \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) d\xi d\theta Q(T) \Big/ \int_0^T [t_1(\tau) - t_2(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

где  $L, R$  – длина и ширина прямоугольного источника;  $r_i = \sqrt{(x_i - \xi)^2 + (y_i - \theta)^2}$  – расстояние между точками с координатами  $(\xi, \theta)$  и  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2$ .

Аналогичная формула была получена и для источника тепла круглой формы.

Оценка точности формулы (2) проводилась с помощью вычислительного эксперимента, имитирующего процесс измерения теплопроводности. В качестве измерительной информации  $Q(T)$ ,  $t_1(\tau)$ ,  $t_2(\tau)$  использовались значения, вычисляемые по тепловой модели распределенного источника тепла постоянной мощности, действующего в полуограниченной однородной среде в течение заданного интервала времени.

Экспериментальные исследования метода проводились на теплоизмерительной ячейке (ТЯ), представленной на рис. 1.



**Рис. 1** Схема теплоизмерительной ячейки:

1 – теплоприемник; 2 – датчик теплового потока; 3 – нагреватель;  
4, 5 – дифференциальные термопары; 6 – образец

Коэффициенты градуировочной характеристики ТЯ определялись методом наименьших квадратов с помощью образцов с известными значениями теплопроводности:  $\lambda_1 = 0,060$  Вт/(м·К),  $\lambda_2 = 0,195$  Вт/(м·К),  $\lambda_3 = 0,220$  Вт/(м·К),  $\lambda_4 = 0,374$  Вт/(м·К),  $\lambda_5 = 0,413$  Вт/(м·К).

Максимальное отклонение аппроксимирующей прямой градуировочной характеристики от известных значений теплопроводности с учетом погрешности определения коэффициентов не превышало 7 %.

Проведенные исследования будут использованы при разработке прибора для измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов.

#### Список литературы

1 Азима Ю.И. Метод измерения теплопроводности на основе интегральной формы уравнения Фурье / Ю.И. Азима // Заводская лаборатория. 2000. № 6. С.27 – 32.

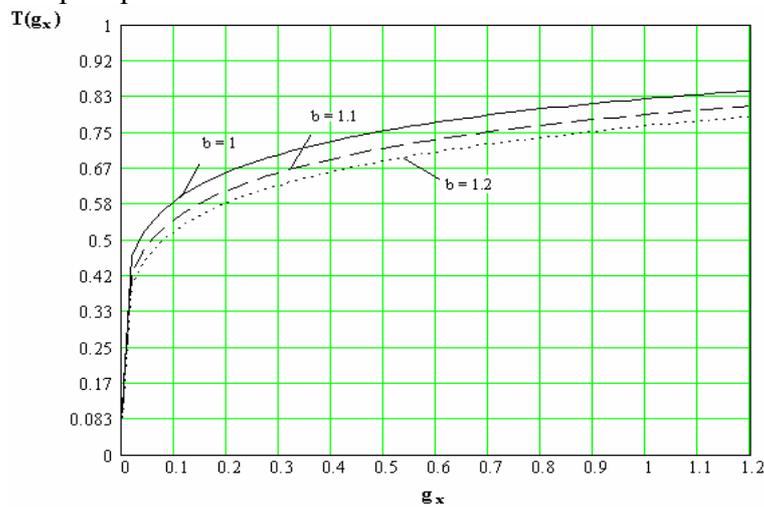
*Н.А. Конышева*

Тамбовский государственный технический университет

## УСЛОВИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

Краевая задача, лежащая в основе определения теплофизических свойств (ТФС) ортотропного полуограниченного тела, нагрев которого производится на поверхности  $z = 0$  через ее квадратный участок, решается в области временных интегральных преобразований Лапласа и пространственных косинус-преобразований Фурье. Получена зависимость временной интегральной характеристики (ВИХ) температуры поверхности исследуемого материала от комплекса ортотропных ТФС. ВИХ температуры и теплового потока представляют собой преобразования Лапласа и рассчитываются по экспериментально измеренным поверхностными датчиками значениям температуры и теплового потока. В результате решения данной задачи определяются значения неполного комплекса ортотропных ТФС: температуропроводности  $a_x$  и  $a_y$  и коэффициент тепловой активности  $\theta_z$ , направленной по оси  $z$ .

Для определения остальных ТФС:  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $a_z$  и  $\lambda_z$  используется решение задачи нагрева полуограниченного тела тепловым потоком плотностью  $q_{II} = q$ , поступающего через бесконечную полосу  $-\ell < x < \ell$  поверхности  $z = 0$ , при этом часть поверхности  $|x| > \ell$ ,  $-\infty < y < \infty$ ,  $z = 0$  находится при начальных нулевых граничных условиях. Для того, чтобы использовать решение данной задачи в предыдущей, были найдены условия адекватности исходного теплового процесса реальному. Для этого рассматривались решения двух задач в области временных преобразований Лапласа.



**Рис. 1** Графики зависимости  $T(g_x)$

На рис. 1 показана зависимость отношения  $T$  значений ВИХ температуры поверхности двух задач от безразмерного параметра  $g_x$  (аналог Фурье,  $g_x = \frac{p\ell^2}{a_x}$ ,  $p$  – параметр преобразования Лапласа), где

$$T(g_x) = \frac{U_k^*(g_x)}{U_p^*(g_x)}, \quad U_k^*(g_x) \text{ – ВИХ температуры поверхности в точке } x \text{ в задаче нагрева полуограниченного тела через квадратный участок со стороной } 2\ell \text{ (} x > \ell), \quad U_p^*(g_x) \text{ – ВИХ температуры поверхности}$$

полуограниченного тела нагреваемого через бесконечную полосу вдоль оси  $y$  шириной  $2\ell$ ,  $b = \frac{x}{\ell}$ .

Зная соотношение  $T(g_x)$  и рассчитывая ВИХ температуры поверхности ортотропного материала по измеренным значениям температуры в точке  $x = x_1$  для найденного расчетным путем оптимального  $g_x$ , определяется ВИХ температуры поверхности  $U_p^*(g_x)$ . По экспериментально найденным значениям ВИХ температуры поверхности  $U_p^*(g_x)$  ортотропного полуограниченного тела в точке  $x = x_1$  рассчитывается температура в этой точке для задачи, нагрев в которой производится через бесконечную полосу. После чего по данной температуре в определенный момент времени и находятся ТФС:  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $a_z$  и  $\lambda_z$ .

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. А.А. Чурикова

*А.А. Липаев, И.И. Маннанов, С.П. Евтушенко \**

Альметьевский государственный нефтяной институт  
\*Казанский государственный университет

## **КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

В настоящее время в зависимости от характера решаемых задач и имеющихся технических возможностей тепловые свойства пород определяются различными способами. Их можно разделить на аналитические, скважинные, лабораторные, комбинированные и косвенные.

Особый интерес представляет определение тепловых свойств пород при помощи косвенных методов. В основе этих методов лежат зависимости между тепловыми и другими петрофизическими свойствами, такими как плотность, пористость, скорость распространения тепловых свойств и др. Наиболее привлекательным здесь является возможность «вторичного» использования материалов геофизических исследований скважин (ГИС). Проблемой этих методов является наличие достоверной информации о корреляции петрофизических свойств для различных литологических групп горных пород. Косвенная оценка тепловых свойств горных пород особенно актуальна для определения свойств разрезов скважин, так как непосредственное определение этих характеристик связано с большими трудностями и погрешностями.

Исследованиями в области установления корреляционных зависимостей занимались такие ученые как В.В. Бабаев, В.Ф. Будымка, Т.А. Сергеев, В.М. Тихомиров, А.А. Липаев, К.В. Васильев, А.Н. Саламатин, С.А. Николаев и др. Обзор, проведенный авторами, показал, что многомерные зависимости между петрофизическими величинами имеют существенно более высокий коэффициент корреляции, чем парные связи и могут быть использованы для оценки теплопроводности. Причем для повышения точности определения тепловых свойств горных пород число аргументов в уравнениях регрессии необходимо увеличивать. В настоящее время задачу косвенного определения тепловых свойств горных пород нельзя считать полностью решенной.

Авторы доклада рассмотрели вопрос о погрешностях косвенных, измерений, так как это имеет решающее значение при использовании данных о тепловых свойствах для проектирования тепловых методов разработки. Возникает ряд трудностей, касающихся методики определения тепловых свойств косвенными методами. Во-первых, данные ГИС сами по себе представляет измерения косвенных величин (КС, СП) и зависят от множества факторов. Во-вторых, в основе интерпретации материалов ГИС заведомо заложена погрешность, так как производится определение петрофизических характеристик на основе интерпретации электрических величин. В-третьих, моделирование пластовых условий в лаборатории сопряжено с рядом трудностей. В-четвертых, керны, отобранные в процессе бурения скважин, представляют собой сильно диспергированную структуру в результате деформирующих усилий со стороны бурильного инструмента, а также промывочных жидкостей, движущихся с большими «весовыми» скоростями и под большими давлениями. Из-за непосредственного контакта горных пород с промывочными жидкостями керны неизбежно насыщаются влагой. Эти факторы приводят к нарушению структуры и агрегатного состояния горных пород и, в конечном счете, вызывают изменение физических свойств горных пород.

В этой связи задача оценки всех вышеизложенных факторов, влияющих на эффективность косвенных методов определения тепловых свойств, является сложной и представляет большой интерес.

*Н.Ф. Майникова, А.С. Чех, С.С. Никулин*

Тамбовский государственный технический университет

## **МЕТОДИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Разработан метод оперативного неразрушающего теплофизического контроля полимеров и композиционных материалов на их основе [1]. Метод позволяет не только определять теплофизические характеристики (ТФХ), но и регистрировать и различать твердофазные полиморфные и релаксационные переходы в полимерах при одной кратковременной реализации эксперимента. Метод включает: тепловое воздействие от плоского круглого источника тепла постоянной мощности; одновременное фиксирование температурных откликов в нескольких заданных точках поверхности исследуемого тела на стадиях нагрева и остывания; пошаговую обработку термограмм по разработанным алгоритмам с помощью измерительно-вычислительной системы (ИВС). Конструкция ИВС и принцип ее действия детально описаны в работе [2].

Возможно применение нескольких методик контроля. Основная из них позволяет не только определять комплекс ТФХ, но и фиксировать температурно-временные характеристики структурных превращений в полимерах в исследуемом диапазоне температур. Фиксирование структурных превращений осуществляется по аномалиям ТФХ в узких температурном и временном интервалах с изменением интенсивного параметра (температуры или времени) и предусматривает проведение градуировки ИВС по двум образцовым мерам. Методика включает в себя следующие этапы:

1 Градуировка прибора: фиксирование термограмм на двух образцах с известными ТФХ; определение рабочих участков термограмм; расчет постоянных прибора.

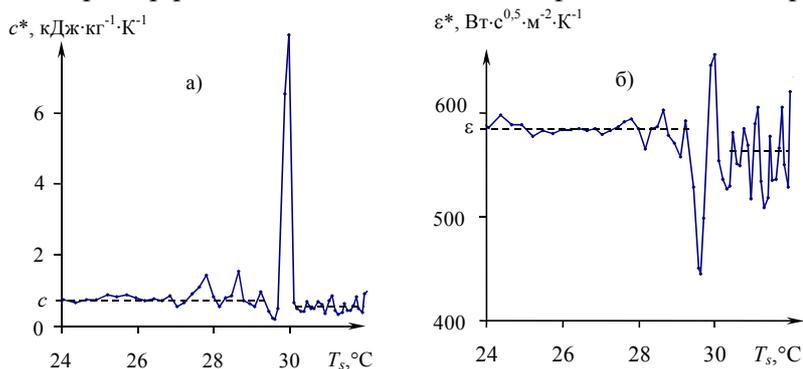
2 Фиксирование термограмм на исследуемом образце. Определение рабочих участков каждой термограммы. Для расчета текущих значений параметров математических моделей [1] (коэффициентов  $b_0$ ,  $b_1$ , и  $h$ ) экспериментальную термограмму разбивают на интервалы с номерами точек  $1...k$ ;  $2...k+1$ ;  $u - k + 1...u$ , где  $k$  – целое положительное нечетное число, большее 3,  $u$  – количество точек в термограмме. Для каждого интервала вычисляют значения  $b_{1i}$ ,  $b_{0i}$ ,  $h_i$  и  $T_s$ . Здесь  $T_s$  – средняя температура изделия из  $k$  текущих пошаговых измерений. Вычисление текущих значений ТФХ (тепловой активности –  $\varepsilon^*$ , теплопроводности –  $\lambda^*$ , комплекса –  $\mu^* = \varepsilon^*/(\lambda^*)^2$ , теплоемкости –  $c^*$ ) по каждому интервалу. Построение зависимостей  $\varepsilon^* = f(T_s)$ ,  $\lambda^* = f(T_s)$ ,  $c^* = f(T_s)$ ,  $\mu^* = f(T_s)$ . Построение зависимостей  $\varepsilon^* = f(\tau)$ ,  $\lambda^* = f(\tau)$ ,  $c^* = f(\tau)$ ,  $\mu^* = f(\tau)$ .

3 Определение ТФХ материала.

4 Фиксирование температурно-временных параметров структурных превращений, которые сопровождаются аномальными изменениями ТФХ на узких температурном и временном интервалах, путем анализа построенных зависимостей  $\varepsilon^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $c^*$ ,  $\mu^*$  от температуры или времени.

5 Дифференцирование релаксационных и твердофазных превращений по данным (например, трех) термограмм, зафиксированных при различных скоростях изменения температуры (с ростом скорости изменения температуры релаксационные переходы перемещаются в сторону больших температур, чего не происходит с фазовыми переходами).

Пример реализации методики теплофизического контроля приведен на рис.



**Рис. Иллюстрации аномалий  $c^*$  и  $\varepsilon^*$  на кривых  $c^* = f(T_s)$  и  $\varepsilon^* = f(T_s)$  для  $\Phi 4\text{K}20$**

Зависимости  $c^* = f(T_s)$  и  $\varepsilon^* = f(T_s)$  для коксонаполненного политетрафторэтилена марки  $\Phi 4\text{K}20$  построены по термограмме, зарегистрированной в центре зонда на стадии нагрева при следующих условиях опыта: начальная температура –  $T_n = 18,3$   $^\circ\text{C}$ ; радиус нагревателя –  $R_n = 2,5$  мм; мощность источника тепла  $W = 0,6$  Вт; временной шаг измерения температуры  $\Delta\tau = 0,5$  с. Твердофазное превращение в кристалличе-

ской фазе материала Ф4К20 при 30 °С зафиксировано на обеих зависимостях. Значения ТФХ, определенные на рабочем участке вне зоны структурного превращения:  $c = 0,7 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 585 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1}$ .

### Список литературы

1 Многомодельный метод неразрушающего теплофизического контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, А.С. Чех // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 2. Рубрика 01. Препринт № 07. 36 с.

2 Измерительно-вычислительная система для контроля теплофизических свойств и структурных превращений в полимерах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, А.П. Пудовкин // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тезисы докладов Четвертой международной теплофизической школы / ТГТУ. Тамбов, 2001. Ч. 2. С. 44 – 45.

*И.В. Мещеряков, С.Н. Максимов, А.Г. Чильманкин,  
Е.С. Зинченко*

Тамбовский государственный технический университет

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассматриваются задачи тепловизионного контроля электрооборудования и воздушных линий электропередач, теплопереноса в конкретных устройствах элементов электрооборудования при различных токовых нагрузках и различных условиях окружающей среды (температуры, влажности, скорости воздушных потоков).

Принятие решений о возможности эксплуатации электрооборудования определяется нормируемыми значениями температурных полей исследуемых элементов при заданных внешних условиях и номинальных нагрузках в соответствии с РД 34.45-51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Следовательно, тепловое изображение реального объекта, полученное в реальных условиях, должно быть преобразовано в температурное поле соответствующее нормируемым условиям. Для этого необходимо моделировать процессы теплопереноса в элементах электрооборудования таких как силовые кабели, токоведущие контактные соединения в различных исполнениях: ножевые разъединители, болтовые соединения и др.

В работе использована интерактивная среда femlab, которая применена для моделирования тепловых процессов описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных и их решения конечноэлементными методами.

Построены и решены тестовые задачи для отладки алгоритмов решения задач.

Решены задачи для тел простой формы: пластина, стержень, полый цилиндр.

Проведено имитационное моделирование процессов теплопереноса при линейных и нелинейных граничных условиях для стационарных и нестационарных задач в линиях электропередач, контактных соединителях представленных в виде системы тел простой формы.

Переход от реальных значений к нормируемым значениям осуществляется решением соответствующих краевых задач.

Это позволяет существенно облегчить процедуру тепловизионных обследований объектов электроэнергетики, повысить точность и достоверность их результатов.

*Д.М. Мордасов*

Тамбовский государственный технический университет

### СТРУЙНО-АКУСТИЧЕСКОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ

В основу всех пневматических методов контроля плотности веществ положен принцип контроля замещением, согласно которому о контролируемой величине судят по параметрам замещающей ее газовой среды.

Методы контроля, основанные на струйно-акустическом замещении, заключаются во взаимодействии акустически-модулированной газовой струи с контролируемым веществом и измерении фазовых изменений, о которых косвенно судят по смещению экстремумов в распределении амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн.

Осуществлено математическое описание процессов взаимодействия струйно-акустического сигнала с нагрузками различного типа (жидкие, твердые и сыпучие вещества).

Разработан струйно-акустический метод контроля жидких веществ, в котором информативный сигнал однозначно определяется их плотностью. Чувствительность такого метода составляет  $50 \text{ (кг/м}^3\text{)/мм}$ , а погрешность не превышает 2,0 %.

Выявлено, что при контроле плотности сыпучих материалов фазовые смещения в режиме стоячих волн, в силу емкостного характера нагрузки, определяются концентрацией газовой фазы в контролируемом слое. Плотность частиц материала определяют при известной высоте слоя и его массе. Погрешность такого метода не превышает 3,0 %.

Созданы бесконтактные струйно-акустические устройства контроля плотности веществ, предел допустимой основной приведенной погрешности которых не превышает 5,0 %.

Струйно-акустические методы контроля плотности являются неразрушающими, позволяют оперативно и с достаточной точностью получить информацию о контролируемом параметре в условиях потенциально опасных производств, реализующие их устройства обладают высокой надежностью, простой конструкции и низкой стоимостью.

*Д.М. Мордасов, М.Н. Баршутина*

Тамбовский государственный технический университет

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Пневмодинамические методы измерения плотности веществ основаны на измерении времени или количества импульсов при заполнении измерительной емкости газом до заданного давления.

Одним из основных источников погрешности в рассматриваемых методах является различие температур питающего газа и газа в измерительной емкости.

В целях создания научно-методической базы проектирования блоков коррекции температурной погрешности, теоретически и экспериментально изучено влияние температуры на результат измерения плотности.

Получены зависимости относительной погрешности измерений от температур питающего газа и газа в измерительной емкости.

Анализ полученных зависимостей показал, что при непрерывной подаче газа в измерительную емкость, также как и при импульсной, они носят нелинейный характер, а погрешность достигает 2 %.

Коррекцию данной погрешности предложено осуществлять изменением объема компенсирующей емкости, подключенной или к измерительной (в непрерывном методе), или к дозирующей (в импульсном методе) емкости.

В результате аппроксимации полиномом первой степени зависимостей, связывающих изменение объема газовой фазы с изменением температуры, получены статические характеристики корректирующих устройств, использование которых позволит снизить погрешность измерения плотности вызванную влиянием температуры до 0,2 %.

*М.М. Мордасов, Н.М. Гребенникова*

## ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Для контроля вязкости в ряде методов используют колебания жидкости в  $U$ -образной трубке. Вязкость, в этих методах характеризуется степенью затухания колебаний. Однако автоматизация этого метода затруднена. В последнее время свое развитие получили перспективные бесконтактные аэрогидродинамические методы. Ряд бесконтактных методов контроля основан на измерении параметров автоколебаний, возникающих на поверхности жидкости при воздействии постоянного потока газа. Применение таких методов для контроля высоковязких сред, содержащих твердые или газовые включения, не обеспечивает достаточной точности.

Нами предложен новый аэродинамический бесконтактный метод позволяющий повысить точность измерения. Сущность разработанного метода состоит в том, что на поверхность контролируемой жидкости действуют импульсной последовательностью пневматических импульсов с переменной частотой. Изменение частоты продолжается до момента достижения амплитудой колебаний поверхности жидкости в месте контакта со струей заданного значения. Фиксируется частота импульсов, по которой судят о вязкости жидкости.

Разработано устройство, реализующее импульсный метод измерения. Одним из основных узлов устройства является источник пульсирующей струи газа. Разработан генератор, позволяющий получать пневматический сигнал в виде отдельных импульсов с частотой до 20 Гц и независимой настройкой длительности импульса и скважности. Контроль параметров углубления проводилось оптическими методами.

Экспериментальные исследования системы «струя газа – жидкость» при импульсном режиме воздействия показали избирательность данной системы. Амплитуда колебания жидкости достигает определенного значения, при различных частотах в зависимости от вязкости жидкости. Увеличение вязкости жидкости приводит к увеличению частоты пневматических импульсов необходимых для заданного значения амплитуды.

Экспериментальные исследования метода показали целесообразность его применения для жидкостей с вязкостью от 2 до 150 Па·с. Погрешность измерения определяется в основном погрешностью измерения амплитуды колебаний поверхности жидкости.

*В.П. Попов, К.В. Попова*

Тамбовский государственный технический университет

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О НАХОЖДЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОСНОВАНИИ ОГРАНИЧЕННОГО ЦИЛИНДРА\*

В основании цилиндра радиуса  $R$  и высотой  $H$  с теплофизическими характеристиками: коэффициентами теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$ , помещен плоский круглый источник теплового потока радиуса  $R_1 < R$  постоянной мощности  $q$ . Задача нахождения температурного поля сводится к решению уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial U(r, z, t)}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 U(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(r, z, t)}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

$$t \geq 0 \quad ; \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq z \leq H$$

с краевыми условиями:

$$U(r, z, 0) = 0; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial U(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad (1.2)$$

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. А.А. Чурикова

$$\lambda \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} -q, 0 \leq r \leq R_1 \\ 0, R_1 < r \leq R \end{cases}; \quad U(r, H, t) = W(r, t). \quad (1.3)$$

Решение задачи (1) – (1.3) находится с использованием преобразований Лапласа и конечных преобразований Ханкеля и для нижнего основания имеет следующий вид:

$$U(r, 0, t) = \frac{2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(r \frac{\mu_n}{R}\right)}{\mu_n^2 J_0^2(\mu_n)} \times \\ \times \frac{\left(4\lambda W_{cp} J_2(\mu_n) + q R_1 J_1\left(R_1 \frac{\mu_n}{R}\right) sh H \beta_n\right)}{ch H \beta_n} \times \\ \times \left(1 - \exp(-a \beta_n^2 t)\right),$$

где  $J_0, J_1, J_2$  – функции Бесселя соответствующих порядков;  $\mu_n = \beta_n R, n = 1, 2, \dots$  – нули функции Бесселя первого рода первого порядка;  $W_{cp}$  – средняя температура на верхнем основании цилиндра.

Для нижнего основания цилиндра можно подсчитать поверхностную интегральную характеристику (ПИХ)  $S(t)$ :

$$S(t) = \frac{16RW_{cp}}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1\left(R_1 \frac{\mu_n}{R}\right) J_2(\mu_n) (1 - \exp(-a \beta_n^2 t))}{\mu_n^3 J_0^2(\mu_n) ch H \beta_n} + \\ + q \frac{4R}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1^2\left(R_1 \frac{\mu_n}{R}\right)}{\mu_n^3 J_0^2(\mu_n)} th H \beta_n (1 - \exp(-a \beta_n^2 t))$$

**В.П. Попов, А.А. Чуриков, К.В. Попова**

Тамбовский государственный технический университет

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Рассмотрим следующую модель теплового процесса. Полуограниченное тело  $0 \leq r < \infty, -\infty < z \leq 0$ , с теплофизическими характеристиками: коэффициентами теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$ , нагревается на поверхности тела ( $z = 0$ ) плоским круглым источником теплового потока радиуса  $R$  и постоянной мощности  $q$ . Температурное поле в этом теле будет описываться решением следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial U(r, z, t)}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 U(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(r, z, t)}{\partial z^2} \right]; \quad (1)$$

$$U(r, z, 0) = 0; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial U(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad U(\infty, z, t) = 0; \quad (1.2)$$

$$\lambda \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial z} = \begin{cases} q, z = 0, 0 \leq r \leq R \\ 0, z = 0, r > R \end{cases}; \quad U(r, -\infty, t) = 0. \quad (1.3)$$

Задача (1) – (1.3) на поверхности тела имеет решение

$$U(r, 0, t) = \frac{q}{\lambda} \left\{ 2 \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right)\right) + \sqrt{r^2 + R^2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + R^2}}{2\sqrt{at}}\right) - r \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{at}}\right) \right\} \quad (2)$$

Это позволяет посчитать поверхностно-интегральную характеристику (ПИХ)

$$S(t) = \frac{2}{R^2} \int_0^R U(r, 0, t) r dr = \frac{8qR}{3\lambda\sqrt{\pi}} \left[ \operatorname{Fo}^{3/2} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{4\operatorname{Fo}}\right)\right)^2 + \operatorname{Fo}^{1/2} \exp\left(-\frac{1}{4\operatorname{Fo}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{4\operatorname{Fo}}\right)\right) + \sqrt{\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2\operatorname{Fo}}}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}}}\right) \right) \right], \operatorname{Fo} = \frac{at}{R^2} \quad (3)$$

Интегратор температуры нагреваемого круга на поверхности  $z = 0$  позволяет измерить ПИХ  $S(t)$ . Используя экспериментальные данные  $S(t_1)$  и  $S(t_2)$ , получим уравнение относительно  $a$ :

$$\frac{S(t_2)}{S(t_1)} = \frac{f(\operatorname{Fo}_2)}{f(\operatorname{Fo}_1)}, \quad \text{где } \operatorname{Fo}_i = \frac{at_i}{R^2}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Если

$$\operatorname{Fo}_2 = \mu \operatorname{Fo}_1, \quad \mu > 1 \quad \text{и} \quad S(t_2) = \nu S(t_1), \quad \nu > 1, \quad (5)$$

то (4) преобразуется в уравнение относительно  $\operatorname{Fo}_1$ :

$$\nu f(\operatorname{Fo}_1) = f(\mu \operatorname{Fo}_1). \quad (4.1)$$

Так как  $y = f(\operatorname{Fo}_1)$  является возрастающей функцией при  $\operatorname{Fo}_1 \geq 0$ , то условие (5) является достаточным условием решения уравнения (4.1). Задавая  $\mu, \nu$  и решая (4.1) можно составить таблицу значений  $\operatorname{Fo}_1$  и использовать ее непосредственно в процессе эксперимента.

И, наконец, по значению  $\operatorname{Fo}_1$  определяем  $a$  и из уравнения (3) находим  $\lambda$ .

**Р.В. Пугачев**

Тамбовский государственный технический университет

## **ТЕРМОЗОНД ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ\***

В связи с ростом объема экспериментальных исследований по определению характеристик различных материалов особую значимость приобретают тепловые методы и средства неразрушающего контроля, позволяющие оперативно и достоверно определить качество исследуемых материалов и изделий по их теплофизическим свойствам (ТФС).

Основным элементом измерительного канала процессорных средств теплофизических измерений является термозонд, предназначенный для проведения температурно-временных исследований контролируемого объекта.

В термозонде для неразрушающего контроля (НК) теплопроводности материалов [1] температурно-временные измерения в процессе проведения эксперимента осуществляются с помощью термобатарей, расположенной на поверхности теплоизоляционной подложки из материала с низкой теплопроводностью. Кроме того, после окончания эксперимента проводят измерения момента исчезновения температурного градиента по всему объему теплоизоляционной подложки, дополнительно размещенными внутри теплоизоляционной подложки термобатареями, что является необходимым условием для проведения следующего эксперимента.

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. А.А. Чурикова

Недостатком такого зонда является низкая производительность измерений, обусловленная значительным временем устранения температурного градиента по объему теплоизоляционной подложки. Кроме того, измерительная процедура характеризуется дополнительной погрешностью, обусловленной аккумулярованием неучтенного тепла в теплоизоляционную подложку в процессе проведения эксперимента.

Повышение оперативности и точности проводимых теплофизических измерений в рассматриваемом устройстве может быть достигнуто изменением конструкции измерительной головки термозонда [2], а именно, заменой материала теплоизоляционной подложки с низкой теплопроводностью на материал с более высокой теплопроводностью, а также помещением внутрь теплоизоляционной подложки, на определенном расстоянии от контактной плоскости, датчика теплового потока.

Вследствие того, что датчик теплового потока имеет ограниченные размеры, на границах датчика возникают небольшие неучтенные тепловые потери. Для получения в процессе измерения наиболее достоверных результатов в подложку, вместо датчика теплового потока, по радиусу дуги с центром в точке расположения линейного нагревателя, можно поместить определенное количество линейных термопар, электроды которых располагают параллельно источнику тепла. С целью повышения чувствительности измерения температуры, и получения среднего значения температуры по всему радиусу  $R$  термопары свариваются в стык и соединяются последовательно. С термопар, в течение всего процесса измерения, измерительно-вычислительной системой (ИВС) регистрируются результаты измерения, которые подставляются в расчетную зависимость и служат для определения тепла, ушедшего внутрь подложки.

Данный подход не только позволяет более точно учесть тепло, уходящее в теплоизоляционную подложку, но и повысить точность результатов измерения за счет более адекватной реализации аналитических решений, а также увеличить производительность измерений.

### **Список литературы**

- 1 А.с. 2170423 РФ, МКИ G 01N 25/18. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / В.Н. Чернышов и др. - № 2000112296/28. Заявл. 16.05.2000; Оpubл. 10.07.2001. Бюл. № 47. 10 с.
- 2 Пугачев Р.В. Термозонд для определения ТФС твердых материалов / Р.В. Пугачев. Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. 15. 280 с.

*Л.И. Рожнова*

Тамбовский государственный технический университет

## **ЭКСПРЕСС-МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТЕРМОПЛАСТОВ**

Для выбора температурных режимов высокоэффективного способа переработки термопластов в твердой фазе необходимо знать их релаксационные свойства, в первую очередь температурные переходы в диапазоне от комнатной до температуры стеклования  $T_c$  аморфных и температуры плавления  $T_{пл}$  кристаллических термопластов.

Обычно эти температурные переходы регистрируются известными методами линейной дилатометрии, механических и диэлектрических потерь, акустическими и теплофизическими методами, которые, как правило, реализуются в лабораторных условиях с использованием модельных полимерных образцов определенных размеров и формы.

Предлагается метод определения температурных переходов и теплофизических свойств (ТФС) термопластов, позволяющий оперативно и с достаточной для теплофизических измерений точностью в производственных условиях определить искомые параметры.

Сущность метода состоит в том, что на поверхность заготовки термопласта, предназначенной для твердофазного формования, осуществляется тепловое воздействие от линейного источника тепла. Адаптивно изменяют его мощность, обеспечивая заранее заданную скорость нагрева исследуемого объекта. Регистрируют в нескольких точках, расположенных на заданных расстояниях по обе стороны от

линии источника и симметрично ей, термограммы нагрева. Определяют по темпу нагрева выход термограммы на регулярный (автомодельный) режим в точках контроля температуры, начиная с ближней от нагревателя точки контроля. Затем по изменению темпа нагрева, происходящему в контролируемых точках по мере их удаления от нагревателя, определяют температурный переход исследуемого термопласта. Для повышения достоверности усредняют значения температурных переходов во всех точках контроля, а искомые ТФС до температурного перехода и после определяют по соотношениям, полученным из решения краевой задачи теплопроводности для указанного вида теплового воздействия и исследуемого объекта.

Температурным переходам, связанным с релаксационными процессами различных структурных элементов термопластов, соответствует изменение теплофизических характеристик, в частности, коэффициента температуропроводности  $\alpha$ .

Поскольку в соответствии с первой теоремой Г.М. Кондратьева темп нагрева  $m$  пропорционален коэффициенту температуропроводности  $\alpha$ :

$$m = \frac{\alpha}{R^2} K_n,$$

где  $K_n$  – критерий Кондратьева;  $R$  – обобщенный геометрический параметр, то температурным переходам термопластов соответствует скачкообразное изменение термограммы и темпа нагрева, что фиксируется в микропроцессоре.

Таким образом, при нагреве исследуемой заготовки, температурные переходы обнаруживаются в точках контроля по мере удаления их от источника тепла. Эти температуры фиксируются и усредняются в микропроцессоре, что обеспечивает уменьшение случайной составляющей общей погрешности измерения и повышение достоверности определения искомых величин.

Эксперименты на образцах из полиметилметакрилата («органическое стекло») показали наличие температурных переходов в области 20, 80 и 100 °С, что хорошо коррелирует с данными, полученными известными теплофизическими методами.

*Э.В. Сысоев, Р.В. Попов*

Тамбовский государственный технический университет

## **МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

В современных средствах неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) материалов достаточно широкое распространение получили бесконтактные методы. Достоверность и точность этих методов зависят в основном от решения задач, связанных с учетом тепловых потерь в окружающую среду с их поверхности.

Разработанные ранее бесконтактные методы НК ТФС материалов позволяют в той или иной мере решать эти задачи. Однако подобные методы имеют один общий недостаток – подвижную измерительную головку (источник излучения в совокупности с термоприемниками). Это не позволяет в полной мере компенсировать тепловые потери, вызванные отражением луча лазера от поверхности образца, поскольку по мере движения пятна нагрева коэффициент поглощения в каждой из точек, лежащих на траектории теплового воздействия, будет постоянно изменяться. Кроме того, в этих методах имеются механически подвижные узлы, имеющие различные люфты, дребезг, которые вносят дополнительные погрешности в результаты измерений.

Для устранения вышеназванных недостатков, присущих рассмотренным выше методам измерения ТФС материалов, разработан новый метод.

Сущность разработанного метода заключается в следующем. Над исследуемым объектом помещают неподвижный точечный источник тепла и два термоприемника, измеряющих температуры в точках контроля, расположенных соответственно на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$  от центра пятна нагрева. Вначале определяется коэффициент  $k$ , учитывающий потери, обусловленные поглощением части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта. Далее включают источник тепла мощностью  $q_{ит}$  и производят нагрев. В заданный момент

времени  $\tau_1 = (R_2/0,0004)^2$  производят измерение избыточных температур  $T_1, T_2$  в точках контроля, расположенных на расстояниях соответственно  $R_1$  и  $R_2$  от центра пятна нагрева. Затем продолжают нагрев до тех пор, пока в некоторый момент времени  $\tau_x$  избыточная температура  $T_{2\text{зад}}$  в точке контроля  $R_1$  не станет равной значению  $1,1 \cdot T_2$ , а искомые ТФС определяют по следующим зависимостям:

$$a = \frac{1}{\pi\tau_1} \left( \frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2,$$

$$\lambda = \frac{kq_{\text{ит}} \left( \frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left[ \frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left( 1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right]},$$

где  $a$  и  $\lambda$  – коэффициенты температуро- и теплопроводности.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного метода подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в основу его создания, а также эффективность его практического применения в области теплофизических измерений.

Использование неподвижно закрепленных источника излучения и термоприемников позволяет устранить погрешности, присущие методам с подвижной измерительной головкой и в большей степени уменьшить влияние тепловых потерь в окружающую среду на результаты измерений искомых ТФС, что существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Кроме того, отсутствие высокоточных механически подвижных узлов позволяет значительно уменьшить стоимость устройства, реализующего предложенный метод.

*П.А. Федюнин, А.А. Воробьев, Д.А. Дмитриев*

**Тамбовский военный авиационный инженерный институт**

**ВОЛНОВОДЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН КАК  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРО-  
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.  
КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ  
РЕГУЛЯРНОСТИ**

Адекватное проектирование разработанного нами комплекса методов и устройств поверхностных волн для измерения совокупности электро- и теплофизических параметров [1] требует знания границ регулярности волноводных структур поверхностных волн и информативного конструктивного изменения (вариации) регулярности. Нами рассмотрена классификация измерительных волноводов поверхностных волн с точки зрения их регулярности.

1 *Плоскостной волновод*, представляющий собой магнитодиэлектрический слой на металле [1], для которого должно выполняться условие регулярности диэлектрической и магнитной проницаемостей (действительных частей)  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  и толщины магнитодиэлектрического слоя  $b$  по осям  $Z$  и  $X$ , причем  $a$  и  $b \gg$  длины волны, распространяющейся в магнитодиэлектрическом слое. Условие регулярности в данном случае выполняется при наличии «малых» неоднородностей слоя, когда дифракцией волн по оси  $Y$  можно пренебречь. В противном случае, когда дифракцией пренебречь нельзя, коэффициент затухания поля  $\alpha$  не постоянен, т.е. его зависимость от  $y$  в точке измерения  $\alpha = f(y)$ . Алгоритм определения неоднородности рассмотрен нами в [2].

2 *Диэлектрический волновод* с точки зрения регулярности должен обладать неизменным поперечным сечением, т.е. радиусом  $a$  и постоянством электромагнитных свойств ( $\epsilon$  и  $\mu$ ) в продольном направ-

лении. В этом случае отсутствует «прямая» вытекающая волна. При непостоянстве электромагнитных свойств и радиуса волновода, т.е. при наличии малых неоднородностей, а также непрямолинейности диэлектрического волновода, когда радиус изгиба намного больше длины волны, наблюдается наличие «вытекающей» волны.

### 3 Комбинированные системы.

а) Металлический-диэлектрический волновод – регулярная система с точностью до неоднородности.

- Соосное расположение круглого металлического волновода и диэлектрического волновода. При  $a \ll b$ , где  $a$  и  $b$  – радиусы диэлектрического и металлического волноводов, происходит замедление поля поверхностной волны за счет смешанной диэлектрической проницаемости; по формулам эквивалентных параметров [2] можно рассчитать прохождение волны по линии передачи (определяется набег фазы).

- При  $a \gg b$  система представляет собой замедляющую структуру в виде диэлектрического волновода с внутренним металлическим экраном. Коэффициент затухания поля волны рассматриваемой системы как нерегулярной определяется таким же способом, как в случае диэлектрического волновода.

- Соотношение радиусов  $a$  и  $b$  такое, что поле над диэлектрическим волноводом как над замедляющей системой не успеет затухнуть в вертикальной плоскости до металлического волновода. В этом случае интересен тот факт, что у металлического волновода как дисперсной структуры фазовая скорость зависит от длины волны  $V_\phi = \Phi(\lambda)$ , а у диэлектрического волновода как дисперсной структуры коэффициент замедления  $v_z$ , т.е. также  $V_\phi = \Phi(\lambda)$ , то при определенной длине волны фазовая скорость двойной структуры, равная скорости света, есть мера  $\varepsilon'$ .

б) Сильфон – диэлектрический круглый волновод. В этом случае сильфон для волн типа  $E_{mn}$  как металлический волновод является нерегулярной системой, для волн типа  $H_{mn}$  регулярной (эквивалент сильфона – металлический волновод с радиусом  $a$ ).

- Соосное расположение сильфона и диэлектрического волновода. При  $a \ll b$ , где  $a$  и  $b$  – радиусы диэлектрического волновода и сильфона. Сильфон является электромагнитным экраном переменной зоны взаимодействия. Также как и в случае, рассмотренном в п. а), измеряют фазовый сдвиг.

- Соотношение радиусов  $a$  и  $b$  такое, что поле над диэлектрическим волноводом как над замедляющей системой не успеет затухнуть в вертикальной плоскости до металлического экрана. В этом случае, как и в предыдущем варианте комбинированной системы «металлический волновод-диэлектрический волновод» фазовая скорость двойной структуры есть мера  $\varepsilon'$ .

в) Металлический провод – диэлектрический волновод. В таком сочетании имеем дело с однопроводной линией передачи с диэлектрическим покрытием. Регулярная линия передачи в данном случае должна обладать неизменным поперечным сечением, т.е. радиусами металлического провода и диэлектрического покрытия, а также постоянством электромагнитных свойств ( $\varepsilon$  и  $\mu$ ) в продольном направлении. Изменение (непостоянство) коэффициента затухания поля поверхностной волны есть мера неоднородности.

г) Диэлектрический стержень – металлическая спираль. Соосное расположение диэлектрического круглого волновода радиусом  $a$  и металлической спирали радиусом  $b$  и шагом  $\Delta \ll \lambda$ . В данном случае, с нашей точки зрения, интересны следующие варианты.

- При  $a \ll b$  и заземлении металлической спирали, спираль выполняет роль электромагнитного экрана диэлектрического волновода. Этот случай аналогичен п. а).

- Питая металлическую спиральную замедляющую систему ( $a \ll b$ ) током  $I_0$ , создавая поле  $H_0$  продольного подмагничивания диэлектрического волновода, рассматриваются все аналоги комбинации металлического волновода с ферромагнитной жидкостью. Контроль нерегулярностей базируется на эффектах продольного подмагничивания, основной волной в диэлектрическом волноводе является гибридная волна  $HE_{11}$  – аналог волны  $H_{11}$  с линейной поляризацией в круглом металлическом волноводе.

- Одновременно возбуждая электромагнитную волну, например, с помощью рупора, в спиральной замедляющей системе и диэлектрическом волноводе, имеет место сложная замедляющая система (ЗС): недисперсная ЗС в виде спирали и ЗС на базе диэлектрического волновода как дисперсной системы.

- Диэлектрический волновод радиусом  $a$  в виде спирали с радиусом  $R \approx \lambda \gg a$ . Спиральная ЗС в виде диэлектрического волновода излучает быструю волну. В силу осевой симметрии спиральной ЗС

излучение ЭМВ осуществляется вдоль оси ЗС (диэлектрическая спиральная система). Коэффициент затухания поля поверхностной медленной волны над спиральной ЗС обладает большей чувствительностью к изменению  $\varepsilon'$ ,  $\mu' / 2$ .

Таким образом, анализируя рассмотренные варианты можно сделать следующие выводы.

1. Имеет место общее уравнение распространения поверхностной волны – уравнение Максвелла в дисперсной структуре – «однотипные» характеристические уравнения, решения которых вне зависимости от вида ЗС волновода поверхностных волн выявляет поверхностный характер волны, т.е. все волны являются неоднородными с фазовой постоянной как вектором и нормальным ему вектором затухания поля  $\alpha$ .

2. ЗС на основе волновода поверхностных волн является дисперсионной системой.

3. Во всех случаях наблюдается зависимость  $\alpha$  и  $v_z$  от информативных параметрах нерегулярностей

4. Наличие многомодовых режимов и принцип латентности и не латентности мод.

5. Практическая возможность реализации одномодового режима нелатентных мод.

6. Принцип частотного управления сменой мод.

7. Для все вариантов един принцип измерения коэффициента замедления поверхностной медленной волны.

В качестве примера показателны способ и устройство, реализующее его, на регулярном диэлектрическом волноводе для определения концентрации ферромагнитных частиц и продолговатых доменов в жидкости в диапазоне СВЧ [4], а также способ определения концентрации ФМЧ в жидкости и магнитной восприимчивости в диапазоне СВЧ [5].

#### Список литературы

1 Дмитриев Д.А. Поверхностные волны и микроволновые устройства контроля электрофизических параметров магнитодиэлектрических покрытий на металле: Монография / Д.А. Дмитриев, Н.П. Федоров, П.А. Федюнин, В.А. Русин / Под ред. Н.П. Федорова. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. 196 с.

2 Отчет о НИР (заключительный) / Тамбовский ВАИИ. Шифр «Замедление–99»; Тема № 296081; Инв. № 056291. Тамбов, 2002. 136 с.

3 Взятыхшев В.Ф. Диэлектрические волноводы / В.Ф. Взятыхшев. М.: Советское радио, 1970. 21 с.

4 Пат. 2228519 РФ, МКИ G01 N 15/06. Способ определения концентрации ферромагнитных частиц и продолговатых доменов в жидкости в диапазоне СВЧ / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, Н.В. Макаров (РФ). № 2002109365; Заявл.10.04.02; Приоритет 10.04.02. 7 с.

5 Пат. 2170418 РФ, МКИ G01 N 15/06. Способ определения концентрации ФМЧ в жидкости и магнитной восприимчивости в диапазоне СВЧ. / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, М.А. Суслин, (РФ). № 99108324/006585; Заявл. 21.09.99; Оpubл. 10.07.01. 5 с.

*А.В. Чернышов*

Тамбовский государственный технический университет

#### **МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

С целью экономии топливно-энергетических ресурсов в строительстве и энергосбережения ресурсов в сфере жилищно-коммунального хозяйства был принят Федеральный закон «Об энергосбережении» № 28-13 от 03.04.1996, в соответствии с которым введена система паспортизации зданий и их ограждающих конструкций, регламентирующая параметры теплозащиты здания. До настоящего времени оценка тепловых характеристик осуществляется расчетным путем по проектно-информационным пока-

зателям ограждающих конструкций, а также выборочно лабораторным способом на отдельных фрагментах.

В работе предлагается метод оперативного неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных (трехслойных) изделий, например, конструкций стеновых панелей в реальных условиях эксплуатации. Сущность предлагаемого метода заключается в следующем.

На каждую из наружных поверхностей многослойной конструкции устанавливаются по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель, а также термодатчик, помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя. В плоскости контакта второго термодатчика расположены датчик теплового потока, а в центре крута датчика теплового потока вмонтирована вторая термодатчик. Дополнительно устанавливают над наружной поверхностью точечный источник тепловой энергии (лазер) и термоприемник, сфокусированный на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению.

Оба зонда закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипора или асбеста, обеспечивая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева.

Для определения теплофизических свойств наружных слоев конструкции лазер и термоприемник перемещают над исследуемым слоем с постоянной заданной скоростью, осуществляют бесконтактное воздействие тепловыми импульсами от лазера и фиксируют термоприемником значение температуры исследуемого слоя. Изменяют частоту тепловых импульсов лазера до тех пор, пока значение температуры, фиксируемое термоприемником, не станет равной заранее заданным двум значениям, определяют при этом частоты тепловых импульсов соответственно для первого и второго наружных слоев и, используя эту информацию, при помощи полученных математических зависимостей определяют теплофизические характеристики (ТФХ) наружных слоев конструкции.

Для определения ТФХ внутреннего слоя осуществляют тепловое воздействие дисковым нагревателем первого зонда, регистрируют величину теплового потока при помощи датчика, расположенного на контактной плоскости второго зонда, а также измеряют температуру в точках, расположенных соответственно под дисковым нагревателем и на контактной поверхности датчика теплового потока.

Используя измеренные значения температур в указанных точках и измеренное значение теплового потока, пронизывающего слои исследуемой конструкции, а также ранее полученные значения ТФХ наружных слоев, при помощи математических зависимостей, описывающих перепад температур в каждом из трех слоев, определяют искомые теплофизические свойства внутреннего слоя исследуемой конструкции.

Экспериментальная проверка показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов, и позволяет сделать вывод о том, что разработанный метод найдут широкое применение при определении теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций зданий и сооружений.

*Ю.В. Чудинов, А.И. Фесенко*

Тамбовский военный авиационный инженерный институт

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В сообщении рассматривается импульсный метод определения теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов, а также приводится результат его апробации. Физическая модель представляет систему, состоящую из двух полупространств. Первое полупространство (подложка термодатчика) – материал КССБ с известными ТФС ( $a = 2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ), второе – исследуемое. Начальная температура полупространств одинакова.

В граничной области расположен линейный импульсный источник тепла, на расстоянии 1,63 мм от которого расположен датчик температуры (термопара ХК). После подачи теплового импульса в заданной точке контроля исследуемого материала регистрируют интегрированное по времени значение температуры в момент наступления заранее заданного соотношения между значением избыточной температуры и ее дифференциальным по времени значением. После этого рассчитывают искомые теплофизические свойства исследуемого материала, с коррекцией по калибровочной функции. Калибровочную функцию определяют экспериментально по материалам с известными ТФС в заданном диапазоне контроля.

Программное обеспечение состоит из шагов: управление экспериментом, алгоритмов контроля термостатирования, измерения и отображения информации в реальном режиме времени, а также расчета ТФС исследуемых материалов с последующим сохранением и статистической обработкой результатов измерений в оболочке Mathcad. Статистическая оценка ТФС материалов на основании аналитической модели для  $N$  измерений приведена в табл. 1, при этом, погрешность воспроизводимости менее 10 %.

Статистическая оценка ТФС материалов для $N = 50$	Исследуемый материал			
	ри- пор	стек- ло орга- нич.	рези- на вулк.	стекло кварц.
$\lambda_{эТ}$ Вт/(мК)	0,026	0,195	0,222	1,337
$\bar{\lambda}$ Вт/(мК)	0,026	0,194	0,224	1,337
$\sigma_{\lambda} \cdot 10^{-3}$ Вт/(мК)	<b>2,493</b>	6,924	12	90
Случ. погр. %	<b>9,584</b>	3,566	5,517	6,698
Сист. погр. %	<b>0,018</b>	0,433	0,878	0,0028 6
Довер. интервал $\pm \lambda$ $\cdot 10^{-4}$	7,565	20,76	391,2	270
Инт. неопред. $\Delta \lambda$ Вт/(мК)	0,011	0,032	0,048	0,353
$a_{эТ} \cdot 10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	1	1,1	1,15	8,3
$\bar{a} \cdot 10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	<b>1,001</b>	1,075	1,135	8,299
$\sigma_a \cdot 10^{-9}$ м <sup>2</sup> /с	<b>7,871</b>	7,659	6,589	59,08
Случ. погр. %	7,861	7,127	5,805	7,119
Сист. погр. %	0,128	2,302	1,311	0,018
Довер. интервал $\pm a$ $\cdot 10^{-9}$	2,39	2,296	2,086	17,71
Инт. неопред. $\Delta a \cdot 10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	0,258 3	0,313 8	0,222	2,521
$\frac{\Delta a}{\Delta \lambda} \cdot 10^{-7}$	0,043	0,102	0,216	0,140

### Список литературы

1 Чудинов Ю.В. Неразрушающий контроль теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / Ю.В. Чудинов, А.И. Фесенко // VII Всерос. науч.-техн. конф. МСОИ'04 «Повышение эффективно-

*А.А. Чуриков, Г.В. Шишкина*

Тамбовский государственный технический университет

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМПЕРАТУРЫ

Основным информационным параметром в различных методах определения теплофизических свойств (ТФС) является интегральная характеристика (ИХ) температуры вида

$$U^*(p) = \int_0^{\infty} U(t)e^{-pt} dt, \quad p > 0, \quad (1)$$

где  $U(t)$  – температура;  $p$  – параметр преобразования Лапласа.

Но, как видно, параметр  $p$  – произволен и не имеет конкретного численного значения, что говорит о некоторой некорректности результатов решения. Возникает проблема нахождения конкретного численного значения  $p$  – такого, которое обеспечит наилучшие условия адекватности реального проведения контроля ТФС его исходной идеальной модели. В этом случае будет получена наименьшая погрешность определения ТФС исследуемого материала. Величина параметра  $p$  косвенно определяет длительность измерения экспериментальной информации.

Из анализа графика подынтегральной функции

$$f(t) = U(t)e^{-pt}, \quad p = \text{const} \quad (2)$$

видно, что  $f(t)$  имеет определенную точку перегиба, в которой она принимает или максимальное, или минимальное (при охлаждении) значение в некоторый момент времени  $t_1$ .

Момент времени, начиная с которого функция  $f(t)$  практически приближается к нулевому значению, обозначим  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ),  $f(t_2) \cong 0$ .

Проанализировав первую производную функции (2), получим значение параметра интегрирования  $p$ :

$$p = \frac{U'(t)}{U(t)}, \quad \text{где } t = t_2 \text{ или } t = t_1.$$

Таким образом, зная или задавая моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , можно рассчитать параметр преобразования Лапласа  $p$  по экспериментально измеренной температуре и вычисленной первой производной температуры.

В расчетных зависимостях для определения ТФС используются два параметра интегрирования:  $p_1 = p$ ;  $p_2 = kp$ ,  $k > 1$ , для которых находятся два значения ИХ температуры:

$$U^*(p_1) = \int_0^{\infty} U(t)e^{-p_1 t} dt; \quad (3)$$

$$U^*(p_2) = \int_0^{\infty} U(t)e^{-p_2 t} dt. \quad (4)$$

Момент времени, в который функция  $f(t)$  принимает максимальное значение, обозначим  $t_{11}$ .

При  $p > 0$ ,  $k > 1$  очевидно, что если  $f'(t) = 0$ , то

$$\frac{U'(t_1)}{U(t_1)} = p_2 = kp; \quad (5)$$

$$\frac{U'(t_{11})}{U(t_{11})} = p_1 = p. \quad (6)$$

Таким образом, можно сделать важный вывод: чтобы точно рассчитать значение ИХ температуры (1) и при этом определить величину параметра интегрирования  $p$ , не обязательно вести нагрев до естественного момента  $t \rightarrow \infty$ , когда температура достигнет стационарного значения. Можно задать конечные значения  $t_{11} > t_1$  и для них найти из реально идущего процесса нагрева  $p_1 = p$  и  $p_2 = kp$ , при этом  $t_{11} = kt_1$ .

Зная  $p_1$  и  $p_2$ , можно найти значение коэффициента  $k$ :

$$k = \frac{p_2}{p_1} = \frac{kp}{p}. \quad (7)$$

Конкретное значение  $k$  определяется теплофизическими свойствами исследуемых и эталонных материалов, или ограничением на длительность процесса нагрева.

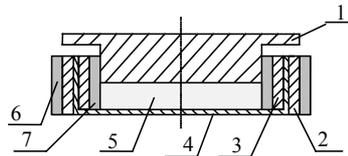
*Г.В. Шишкина*

Тамбовский государственный технический университет

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАЩИТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При исследовании теплофизических свойств влагонасыщенных, сыпучих или химически агрессивных материалов в состав измерительного устройства входит специальная дополнительная защитная ячейка, позволяющая герметично изолировать этот материал от окружающей среды и от поверхности эталонного образца. Это позволяет в течение эксперимента сохранить начальное массосодержание (влажность) путем исключения процесса высыхания, так как процесс определения теплофизических свойств ведется при различных температурных режимах и различном давлении в длительные интервалы времени. Кроме того, использование дополнительной ячейки защищает поверхность эталонного образца от разрушения и коррозии в результате возможного воздействия содержащихся в исследуемых образцах агрессивных веществ.

На рис. 1 показана конструкция дополнительной ячейки для исследуемого материала. Медная фольга, плотно зажатая между опорными цилиндрами 2 и 3, образует нижнее дно ячейки 4. Толщина фольги  $5 \cdot 10^{-5}$  м.



**Рис. 1** Дополнительная ячейка для исследуемого материала

Внутренняя и внешняя боковые полости ячейки защищены боковыми цилиндрами 6 и 7, изготовленными из агрессивно стойкого и теплозащитного материала. Исследуемый материал 5, помещенный во внутреннюю полость ячейки, закрывается плотно притертой к внутренней полости цилиндра 7 массивной крышкой 1. Материал крышки 1 – медь, как материал, имеющий очень высокую теплопроводность.

Был проведен анализ влияния материала защитной измерительной ячейки на расчетные зависимости для определения теплофизических свойств исследуемого материала.

Анализ, учитывающий объем и теплоемкость дополнительной ячейки, показал, что даже в динамическом режиме влияние медной фольги незначительно, и можно считать, что температуры внутренней и внешней сторон крышки 1 равны.

*А.А. Емельянов, М.В. Гребенников,  
В.Б. Вязовов, Ю.П. Ляшенко*

## **ИЗУЧЕНИЕ И АКТИВИЗАЦИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОБЫ ПРИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ АТОМИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МОДИФИКАЦИИ КАРБИДООБРАЗУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

В теории и практике методов АА спектрометрии в графитовой печи к настоящему времени сформировано направление исследований по изучению механизма действия модификаторов, обоснованному выбору и применению подходящих для этой цели средств и способов. Выдвинуто предложение о необходимости разделения применяемых для стабилизации процесса атомизации модификаторов на две большие группы. Исходя из предполагаемого механизма преобразования и базовых принципов, положенных в основу взаимодействия элемента и компонентов пробы, одну из важнейших групп представляют переходные металлы IVa, Va и VIa подгрупп периодической системы, склонные к карбидообразованию в условиях термической атомизации пробы в графитовой печи.

С применением графитовых атомизаторов открытого и полузакрытого типов исследованы термокинетические эффекты взаимодействия, приводящие к изменению (положения, формы и величины) сигнала абсорбции в моделируемых бинарных системах элементов для группы переходных металлов, обладающих карбидообразующей способностью (V, Cr, Al, Co и др.).

В качестве модификаторов рассмотрено влияние вводимых в избыточных или сопоставимых с определяемым элементом количествах добавок Mo (молибдат аммония), W (вольфрамат натрия), изучены эффекты взаимного влияния указанной выше группы элементов на сигнал абсорбции, а также влияние Mg или Ca для отдельных (из числа исследуемых) элементов.

В целях моделирования условий «глубокой» модификации с полным исключением прямого контакта твердой фазы определяемого элемента и компонентов пробы с поверхностью графита при испарении пробы использовали дозировку на металлическую поверхность и метод атомизации с W-Re петли (зонда).

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать обобщающие выводы, а также установить помимо общих некоторые особенности, характерные для атомизации элементов при их взаимодействии с компонентами системы. В числе других отмечены следующие результаты.

При определении алюминия наблюдается значительный положительный эффект добавок кальция. Проявляются аномалии в изменении импульса абсорбции алюминия в присутствии Mn и Cr, которые выражаются в форме появления дополнительных всплесков, изменяя структуру аналитического сигнала. Подобный эффект наблюдается и в других изученных нами бинарных системах. Так при определении ванадия добавки, в свою очередь Al (в виде алюмокалиевых квасцов), или Cr способны вызывать аналогичные всплески при регистрации абсорбции ванадия.

В условиях эксперимента установлено, что модификация молибденом изменяет кинетику процессов образования атомов, приводит к увеличению сигнала абсорбции V и Sn; положительное действие модификации вольфрамом при определении V и Cr ограничено диапазоном взаимного соотношения компонентов в системе (модификатор – определяемый элемент).

С использованием полученных экспериментальных данных, а также известных результатов, проведен теоретический анализ, изучен возможный механизм действия модификаторов. В теории атомизации известна роль процессов термической диссоциации химических соединений (преимущественно процессов восстановления окислов), кинетические закономерности восстановления определяются в основном диффузионными процессами.

Предполагается, что одним из возможных объяснений механизма положительного эффекта или стабилизирующего действия для рассматриваемого класса модификаторов (особенно добавленных в макроколичествах на поверхность графита) является создание барьерного слоя из карбидов металлов, препятствующих или ограничивающих контактное взаимодействие, диффузию углерода и/или окислов. Известно, что наиболее выраженными барьерными свойствами обладают карбиды переходных металлов именно IVa группы, а также Va и VIa групп.

При совместном присутствии (в бинарных системах) карбидообразующих элементов вероятно существование конкурирующих процессов, основанных на различной способности образовывать устойчивые углеродосодержащие соединения, которые могут приводить к появлению наблюдаемых вспле-

сков в условиях взаимных кинетических ограничений. Предполагается, что процесс атомизации обусловлен твердофазным взаимодействием металла или оксида с углеродом с образованием карбидов. Подобный механизм рассмотрен в известных работах (А.А. Пупышев), на примере оксида алюминия (Д.А. Кацков).

*И.В. Баранов, А.А. Никитин*

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

## МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Изучение тепловых свойств рассматриваемого объекта можно считать завершенным, если в результате исследований получена информация о теплоемкости  $c$ , теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  этого вещества. Знание данных теплофизических характеристик обеспечивает анализ различных тепловых процессов с помощью аналитических уравнений теплопроводности.

Основоположниками развития теоретических основ в области тепловых измерений являются известные российские теплофизики Г.М. Кондратьев, А.В. Лыков, А.Ф. Чудновский и др. Благодаря их научным работам в первой половине XX века были разработаны теоретические основы нестационарных, регулярных и квазистационарных методов, а также методов температурных волн. Одним из направлений совершенствования вышеуказанных методов стало объединение регулярных и квазистационарных методов. В результате чего в стенах проблемной лаборатории им. Г.М. Кондратьева под руководством Е.С. Платунова был создан ряд методов монотонного режима. Разработанные на этой теоретической основе приборы позволяют измерять теплофизические свойства различных материалов в области температур от 4,2 до 3000 К.

Особое место среди теплофизических приборов занимают калориметры с нагревателем. Их главным достоинством является возможность определения в одном опыте всего комплекса теплофизических свойств исследуемого образца. Данные калориметры стали привлекать внимание теплофизиков относительно недавно, в основном благодаря использованию вычислительной техники при регистрации температур и дальнейшей обработке результатов эксперимента.

В калориметрах с нагревателем теплоизмерительная ячейка перед началом опыта находится в тепловом равновесии с внешней средой, а на рабочей стадии опыта разогревается под воздействием внутреннего теплового источника постоянной мощности, оставаясь в тепловом контакте со средой и асимптотически стремясь к неизотермическому стационарному состоянию. Неизотермичность может создаваться разными способами.

В настоящей работе рассмотрено теоретическое обоснование метода комплексного определения тепловых свойств на примере плоской симметричной системы «образец – ядро с нагревателем – образец – среда». Поперечный разрез рассматриваемой тепловой системы с учетом симметричности показан на рис.

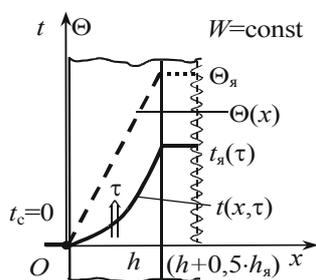


Рис. 1

Металлическое ядро (образца) толщиной  $h_я$  смонтировано в нее электрическим нагревателем. К ядру с обеих сторон плотно прижаты две однородные теплоизоляционные пластины (образцы) толщиной  $h$  каждая. Опыт начинается с того момента, когда внутри металлического ядра включается электронагреватель постоянной мощности. При одновременном воздействии нагревателя и внешней среды ячейка плавно разогревается. С течением времени внутри нее неизбежно устанавливается регулярный тепловой режим, при котором температурное поле пластин и ядра экспоненциально стремится к нерав-

новесному стационарному состоянию. Интерес представляют как регулярная, так и стационарная стадии опыта.

Начало отсчета координаты  $x$  для удобства совмещено с наружной гранью теплоизоляционной пластины. Помимо этого на рисунке для наглядности показано температурное поле ячейки  $t(x, \tau)$  в произвольный момент  $\tau$  на регулярной стадии и это же поле  $\theta(x)$  в стационарном состоянии. Температурное поле металлического ядра предполагается равномерным. Температуру внешней среды условно принимаем равной нулю.

На протяжении всего опыта температурное поле  $t(x, \tau)$  пластины подчиняется дифференциальному уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial t^2}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1)$$

Его решение при идеальном тепловом контакте пластины с ядром и средой, с учетом действующего внутри ядра теплового источника постоянной мощности  $W$ , должно удовлетворять крайевым условиям

$$t(0, \tau) = 0, \quad -\lambda S \frac{\partial t(h, \tau)}{\partial x} = \frac{1}{2} W - \frac{1}{2} C_{\text{я}} \frac{\partial t(h, \tau)}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь исследуемой пластины (совпадает с площадью ядра);  $C_{\text{я}}$  – полная теплоемкость ядра с нагревателем,  $C_{\text{я}} = c_{\text{я}} \rho_{\text{я}} h_{\text{я}} S$ ;  $h_{\text{я}}$  – толщина пластины-ядра.

Температурное поле пластины  $t(x, \tau)$  можно представить в виде разности двух составляющих

$$t(x, \tau) = \theta(x) - \vartheta(x, \tau), \quad (3)$$

где  $\theta(x)$  – температурное поле пластины в установившемся, стационарном состоянии;  $\vartheta(x, \tau)$  – нестационарная составляющая, определяющая недогрев пластины до стационарного состояния.

После подстановки функции (3) в уравнение теплопроводности (1) и крайевые условия (2) появляется возможность в рассматриваемой задаче выделить стационарную и нестационарную составляющие.

Стационарное поле  $\theta(x)$  пластины удовлетворяет стационарному уравнению теплопроводности

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = 0 \quad (4)$$

с крайевыми условиями:

$$\theta(0) = 0, \quad \lambda S \frac{d\theta(h)}{dx} = \frac{1}{2} W. \quad (5)$$

Нестационарное поле  $\vartheta(x, \tau)$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial \vartheta^2}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \quad (6)$$

с крайевыми условиями:

$$\vartheta(0, \tau) = 0, \quad \lambda S \frac{\partial \vartheta(h, \tau)}{\partial x} = -\frac{1}{2} C_{\text{я}} \frac{\partial \vartheta(h, \tau)}{\partial \tau}. \quad (7)$$

Решение стационарной задачи позволяет получить формулу для расчета теплопроводности исследуемых пластин

$$\lambda = \frac{h}{2S} \frac{W}{\theta_{\text{я}}}, \quad (8)$$

где  $\theta_{\text{я}}$  – перегрев ядра относительно внешней среды в стационарном состоянии.

Температурное поле  $\vartheta(x, \tau)$  пластин на этапе разогрева ячейки проходит через регулярную стадию и имеет вид

$$\vartheta(x, \tau) = A \sin(px/h) \exp(-m\tau), \quad (9)$$

где  $A$  – коэффициент, косвенно отражающий начальный перепад температуры образца относительно

среды;  $m$  – темп регулярного нагрева (охлаждения) образца,  $m = a\mu^2, \text{с}^{-1}$ ;  $p$  – безразмерный параметр,  $p = \mu h$ .

Следовательно, для оценки нелинейности температурного поля пластин справедливо соотношение

$$p \operatorname{tg} p = 2C/C_{\text{я}}. \quad (10)$$

где  $C$  – теплоемкость пластин,  $C = crhS$ .

Используем соотношения  $\lambda = acr$ ,  $m = a\mu^2$  и  $p = \mu h$ . После тождественных преобразований приходим к выражению

$$\Psi(p) \equiv \frac{p}{\operatorname{tg} p} = \frac{h C_{\text{я}}}{\lambda 2S} m. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что все параметры, входящие в ее правую часть, либо являются «постоянными» рассматриваемой ячейки, либо измеряются непосредственно в опыте. Следовательно, данное соотношение становится пригодным для расчета функции  $\Psi(p)$ , которая в свою очередь табулирована [4]. Через функцию  $\Psi(p)$  удастся найти параметр  $p$ , который связан с температуропроводностью  $a$  исследуемых пластин и темпом  $m$  разогрева ядра зависимостью  $m = ap^2/h^2$ . Поэтому возможно экспериментально определить коэффициент температуропроводности пластин

$$a = (h^2/p^2)m. \quad (12)$$

Соотношение  $\lambda = acr$  позволяет определить теплоемкость образцов.

Представленный метод комплексного определения теплофизических свойств был реализован при изготовлении автоматизированного плоского калориметра для теплоизоляторов и полупроводников.

Основу ячейки образуют два массивных металлических блока: неподвижный нижний блок и подвижный (съёмный) верхний блок. Образцы имеют форму пластинок круглого или квадратного сечения площадью  $S$  и толщиной  $h$ . Площадь образцов обычно выбирают равной 5...50 см<sup>2</sup>. Опыт проводится с двумя одинаковыми образцами. Нагреватель вмонтирован внутрь тонкой металлической пластинки, сечение которой совпадает с сечением  $S$  образцов. Напомним, что в плоских калориметрах с нагревателем пластинка играет роль металлического ядра. Предполагается, что блоки ячейки сохраняют в опыте одинаковую и постоянную температуру (в простейшем случае комнатную). Указанное условие легко реализуется, если в промежутке между опытами верхний блок имеет хороший тепловой контакт с нижним блоком.

В нагреватель вмонтирован рабочий спай дифференциальной термопары, которая регистрирует его перегрев относительно блоков. Для регистрации показаний дифференциальной термопары использовался специализированный электронно-вычислительный блок (контроллер) на базе 16-разрядного АЦП, разработанный на кафедре вычислительной техники СПбИТМО (ТУ), под руководством А.Е. Платунова.

А теперь, когда в нашем распоряжении имеются все расчетные формулы, позволяющие по результатам одного опыта определить все три теплофизические характеристики исследуемых пластин, уместно обратить внимание на открывающиеся новые возможности ячейки.

### Список литературы

- 1 Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
- 2 Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. Л.: Энергия, 1973. 144 с.

### СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
.....	

*Пленарные доклады*

***Битюков В.К., Петров В.А., Терешин В.В.***

Методология определения коэффициента теплопроводности полупрозрачных материалов. . . . . 7

.....

***Бойцов Б.В.***

Качество жизни в современных условиях. . . . . 17

.....

***Гатапова Н.Ц., Коновалов В.И.***

Методология комплексных теплофизических измерений и экспериментальных исследований процессов сушки материалов с существенной температурной кинетикой. . . . . 19

***Gregory F. Gruska***

Process Management: A Concept of Variation . . . . . 35

.....

***Gregory F. Gruska***

Robust designs Product/Process Design . . . . . 49

.....

***Карташов Э.М.***

Современные аналитические методы при решении краевых задач уравнения теплопроводности в области с движущимися границами и с разнородными граничными условиями на линиях. . . . . 55

.....

***Рудобахта С.П.***

Роль математического моделирования при контроле и управлении качеством дисперсных высушиваемых продуктов. . . . . 60

.....

***Буравой С.Е., Платунов Е.С., Курепин В.В.***

Перспективы исследования теплофизических свойств методами монотонного режима . . . . . 66

.....

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ПРОБЛЕМ  
ЭКОЛОГИИ**

## ЛЕКЦИИ

*Арутюнов Б.А., Арутюнов А.Б.*

Исследование свойств веществ на пограничных кривых фазового перехода жидкость – пар . . . . . 77

.....

*Ветров В.В., Стреляев С.И.*

Электропроводные краски как техническая основа электронагревательных устройств нового поколения . 81

.....

*Дульнев Г.Н.*

Синергетические явления в задачах теплопроводности . . . 87

*Липаев А.А.*

Теплофизика горных пород нефтяных месторождений . . . . 93

*Печенегов Ю.Я., Косова О.Ю.*

Способ измерения расхода теплоносителя с размещением датчика снаружи трубы . . . . . 98

.....

## ДОКЛАДЫ

*Альжанов К.З., Махумдолда А.*

Коэффициенты диффузии бинарных смесей в системе центра масс . . . . . 100

.....

*Ветров В.В., Дубровский Д.В.*

Способ определения скорости вращения высокоскоростного снаряда на основе анализа температурных полей, обусловленных аэродинамическим нагревом . . 106

.....

*Губарев В.Я.*

Исследование теплообмена в газожидкостных потоках . . . 109

*Губарев В.Я., Шацких Ю.В.*

Критериальный подход к анализу работы регенеративных теплообменных аппаратов . . . . . 115

.....

<b>Ищук И.Н., Фесенко А.И.</b> Задача теплопроводности с граничными условиями сопряжения: математическое моделирование и эксперимент . . . .	119
<b>Кудинов Ю.И., Халов Е.А., Сулова С.А.</b> Нейросетевое управление процессом охлаждения проката	123
<b>Курлапов Л.И.</b> Теплофизические свойства кластерных газов . . . . .	127
<b>Шуклин С.Г., Дидик А.А., Шуклин Д.С.</b> Теплофизика вспучивающихся покрытий, содержащих наноструктуры . . . . .	128
<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	
<b>Альжанов К.З., Махумдолда А.</b> Зависимость диффузионного бароэффекта от геометрии капилляра . . . . .	132
<b>Антонова Л.Л.</b> Теоретические основы экспресс-методов неразрушающего теплофизического контроля керамических материалов . . . .	135
<b>Антонова Л.Л., Чуриков А.А.</b> Совершенствование методов неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов . . . . .	137
<b>Арутюнов Б.А., Гоциридзе И.Г.</b> Обобщенные зависимости для разности термодинамических свойств фреонов на линиях насыщения . . . .	139
<b>Арутюнов Б.А., Арутюнов А.Б., Скворцов И.Ю.</b> Метод расчета энтальпии на линиях кипения жидкости и конденсации пара бинарных и тройных смесей . . . . .	141
<b>Арутюнов Б.А., Губина О.П.</b> Исследование изменения термодинамических свойств веществ на пограничных кривых равновесия жидкость-пар	144
<b>Баранов И.В., Прошкин С.С., Самолетов В.А.</b> Исследования теплофизических свойств влагосодержащих материалов в условиях замораживания и размораживания	147

<b>Беляев М.П., Соколов А.Р.</b> Повышение качества дорожного битума отходами полимерной тары и упаковки . . . . .	151
<i>Забавников М.В., Беляев П.С., Маликов О.Г.</i> <b>Исследование процессов набухания и деструкции резиновой крошки при модификации нефтяных битумов . . . . .</b>	152
<b>Иванов М.Д., Докучаев Н.П., Ильин И.В.</b> Универсальная линейка приборов контроля и регулирования технологических параметров . . . . .	154
<i>Карпов А.А.</i> <b>Теплообмен между периодически контактирующими поверхностями . . . . .</b>	157
<i>Климов А.М., Тепляков Ю.А., Максименкова Т.А.</i> <b>Модели аномального массопереноса в полимерах . . . . .</b>	159
<b>Кожухина О.Н., Ярцев В.П.</b> Влияние температуры на закономерности разрушения асбестоцементных труб . . . . .	161
<b>Кузнецов М.А.</b> Результаты экстраполяции изотерм теплоемкости на нулевое давление . . . . .	162
<b>Кусаинов К.К., Мухамедин С.М., Уалиев Е.Б.</b> Физические свойства кластеров и их динамика при электровзрыве . . . . .	166
<b>Печенегов Ю.Я., Денисов В.А.</b> О расчете теплообмена и сопротивления потока газа в трубе при высоких температурах . . . . .	170

**Сафаров М.М., Кобулиев З.В., Ризоев С.Г.**  
Взаимосвязь между тепло- и электропроводностью  
кремнесодержащих сплавов алюминия . . . . . 171  
.....

**Федюнин П.А., Воробьев А.А., Дмитриев Д.А.**  
Сильфонные волноводы поверхностных волн как  
первичные измерительные преобразователи состава и  
свойств жидких сред . . . . . 174  
.....

**Черемухина И.В., Студенцов В.Н., Мацнева Т.А.**  
Теплофизическое обеспечение процессов получения  
полимерных композиционных материалов . . . . . 178  
.....

## **С Е К Ц И Я 2** **НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ** **ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **ЛЕКЦИИ**

**Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Поярков И.В.**  
Экспериментальные методы исследования диффузии  
и диффузионной неустойчивости в многокомпонент-  
ных газовых смесях . . . . . 183  
.....

**Кораблев И.В., Беляев Ю.И., Вент, Д.П.,  
Вепренцева О.Н.**  
Измерители теплопроводности твердых материалов  
системы КБ «Теплофон» . . . . . 188  
.....

**Петров В.А.**  
Измерение температуры полупрозрачных материалов 193  
.....

### **ДОКЛАДЫ**

**Дивин А.Г., Мищенко С.В., Пономарев С.В., Мозгова  
Г.В.**  
Измерительная установка для определения теплофи-  
зических и реологических характеристик полимер-  
ных материалов при сдвиговом течении . . . . . 199  
.....

**Бузилов С.В., Загребин Л.Д., Каракулов О.Е.**  
Измерение температуропроводности эллиптических  
образцов (Метод капли) . . . . . 200  
.....

<b>Дмитриев Д.А., Федюнин П.А., Тетушкин В.А.</b> Основы микроволновой термовлагометрии . . . . .	203
.....	
<b>Жуков Н.П.</b> Теоретические положения метода неразрушающего теплофизического контроля . . . . .	209
.....	
<b>Ивлиев А.Д., Анахов С.В., Мориллов В.В., Шульгин А.В.</b> Измерение температуропроводности жидкого железа АРМКО методом температурных волн . . . . .	213
.....	
<b>Майникова Н.Ф.</b> Об одном решении краевой задачи теплопроводности . . . . .	216
.....	
<b>Пономарев С.В., Толстых С.Г., Беляев М.П.</b> Метод и устройство для измерения коэффициента диффузии влаги в капиллярно-пористых материалах . . . . .	220
.....	
<b>Сафаров М.М., Кобулиев З.В., Ризоев С.Г.</b> Экспериментальная установка для измерения теплофи- зических свойств твердых тел . . . . .	223
.....	
<b>Сенкевич А.Ю.</b> Неразрушающий теплофизический контроль образ- цов с неравномерным начальным распределением температуры . . . . .	225
.....	
<b>Чернышов В.Н., Фокин В.М.</b> Научно-методологические основы эксперименталь- ного определения теплофизических характеристик строительных материалов по температурным измере- ниям . . . . .	229
.....	
<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	
<b>Беляев М.П.</b> Неразрушающий контроль влагопроводности листо- вых материалов . . . . .	234
.....	
<b>Беляев М.П.</b> Неразрушающий контроль качества пропитки мас- сивных материалов . . . . .	235
.....	

<b>Ведешкина Л.А., Дрязгов А.Н., Хануни С.С.</b> Контроль концентрации сложных технологических сред с помощью метода ламинарного режима . . . . .	236
.....	
<b>Воронков А.Г., Ярцев В.П.</b> Теплофизические свойства наполненных эпоксидных композитов . . . . .	237
.....	
<b>Грушо-Новицкая А.О., Гурова Е.В., Ярцев В.П.</b> Влияние техногенных отходов предприятий на теп- лофизические характеристики битума . . . . .	239
.....	
<b>Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Дмитриев А.О.</b> Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов . . . . .	241
.....	
<b>Ермаков А.П., Ермаков С.А., Дрожжин А.И.</b> Микромодуль преобразователя температуры на осно- ве нитевидного кристалла кремния . . . . .	243
.....	
<b>Ермаков С.А., Ермаков А.П., Дрожжин А.И.</b> Преобразователь температуры и скорости потока газа на основе нитевидного кристалла кремния . . . . .	245
.....	
<b>Загребин Л.Д., Каракулов О.Е., Бузилов С.В.</b> Установка для измерения температуропроводности с использованием буферной памяти. Твердые растворы олова в железе . . . . .	247
.....	
<b>Ковалева И.В., Кораблев И.В., Азима Ю.И.</b> Метод измерения теплопроводности низкотеплопро- водных материалов на основе интегральной формы уравнения Фурье . . . . .	249
.....	
<b>Коньшева Н.А.</b> Условия определения неразрушающего контроля теп- лофизических свойств ортотропных материалов . . . . .	251
.....	
<b>Липаев А.А., Маннанов И.И., Евтушенко С.П.</b> Косвенные методы определения тепловых свойств горных пород . . . . .	253
.....	
<b>Майникова Н.Ф., Чех А.С., Никулин С.С.</b> Методика теплофизического контроля полимерных материалов . . . . .	255
.....	

<b>Мещеряков И.В., Максимов С.Н., Чильманкин А.Г., Зинченко Е.С.</b>	
Применение тепловизионных методов для контроля электрооборудования и воздушных линий электропе- редач . . . . .	257
<b>Мордасов Д.М.</b>	
Струйно-акустическое замещение в пневматических методах контроля плотности веществ . . . . .	258
.....	
<b>Мордасов Д.М., Баршутина М.Н.</b>	
Влияние температуры газа на результат измерения плотности веществ пневмодинамическими методами .	259
.....	
<b>Мордасов М.М., Гребенникова Н.М.</b>	
Пневматический метод контроля вязкости жидкостей	260
.....	
<b>Попов В.П., Попова К.В.</b>	
Решение задачи о нахождении температурного поля в основании ограниченного цилиндра . . . . .	262
.....	
<b>Попов В.П., Чуриков А.А., Попова К.В.</b>	
Определение теплофизических характеристик полу- ограниченного твердого тела . . . . .	263
.....	
<b>Пугачев Р.В.</b>	
Термозонд для теплофизических измерений . . . . .	265
.....	
<b>Рожнова Л.И.</b>	
Экспресс-метод неразрушающего контроля теплофи- зических характеристик и температурных переходов термопластов . . . . .	267
.....	
<b>Сысоев Э.В., Попов Р.В.</b>	
Метод бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов . . . . .	268
.....	
<b>Федюнин П.А., Воробьев А.А., Дмитриев Д.А.</b>	
Волноводы поверхностных волн как измерительные преобразователи электро- и теплофизических свойств. Классификация и определение понятия ре- гулярности . . . . .	270

**Чернышов А.В.**

Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств строительных материалов многослойных конструкций . . . . . 275

**Чудинов Ю.В., Фесенко А.И.**

Исследование нового метода контроля теплофизических свойств твердых материалов . . . . . 277

**Чуриков А.А., Шишкина Г.В.**

Экспериментальное определение параметров преобразования Лапласа при вычислении интегральных характеристик температуры . . . . . 279

**Шишкина Г.В.**

Использование защитной измерительной ячейки при определении теплофизических свойств дисперсных материалов . . . . . 281

**Емельянов А.А., Гребенников М.В., Вязовов В.Б.,  
Ляшенко Ю.П.**

Изучение и активизация термохимических процессов в ходе преобразования пробы при электротермической атомизации с применением метода модификации карбидообразующими элементами . . . . . 282

**Баранов И.В., Никитин А.А.**

Методы комплексного измерения теплофизических свойств влагосодержащих материалов . . . . . 284

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРИ КОНТРОЛЕ И УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ

Материалы школы

Часть I

Редактор З.Г. Чернова  
Компьютерное макетирование Е. П. Постниковой

Подписано в печать 16.08.04

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Гарнитура Times New Roman. Объем: 16,51 усл. печ. л.; 16,02 уч.-изд. л.  
Тираж 400 экз. С. 525<sup>М</sup>.

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская 106, к. 14