

**КВАЗИРЕГУЛЯРНЫЙ РЕЖИМ ОХЛАЖДЕНИЯ  
НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ**

*Т.С. СОКОЛОВСКАЯ*

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

Теплофизические постоянные нетканых материалов можно определить из закономерностей изменения температуры предварительно нагретого плоского образца в спокойном воздухе, как это делается в известном методе регулярного режима охлаждения [1]. Темп охлаждения образца в условиях естественной конвекции зависит не только от теплофизических параметров материала и геометрических размеров образца, но и от коэффициента теплоотдачи его поверхности, величина которого определяется теплофизическими параметрами окружающей среды и оптическими свойствами поверхности [2]. Так как теплофизические постоянные воздуха зависят от температуры, связь темпа охлаждения образца с его теплофизическими параметрами становится не такой простой, как в классическом методе регулярного режима

охлаждения [1]. Из измерений темпа охлаждения при известной геометрии образца нельзя сразу определить его температуропроводность [2]. Не выполняется условие постоянства во времени коэффициента теплоотдачи поверхности  $\alpha$  в процессе охлаждения, а следовательно, и критерий Био зависит от температуры. С помощью таблицы теплофизических постоянных сухого воздуха можно найти зависимость  $\alpha$  от температуры для поверхностей с различными значениями степени черноты поверхности  $\varepsilon$  и определить зависимость критерия Био от температуры. В небольшом интервале температур, достаточном для проведения измерений теплофизических постоянных теплоизоляторов, и, в частности, нетканых материалов, можно считать, что изменение критерия Био с температурой происходит по линейному закону:

$$Bi = \bar{Bi}(1 + bt). \quad (1)$$

В процессе охлаждения образца теплоотдача окружающему воздуху уменьшается быстрее, чем разность температур между его поверхностью и воздухом, из-за уменьшения коэффициента теплоотдачи. В результате процесс охлаждения происходит значительно медленнее, чем при реализации регулярного режима. Большое различие времен охлаждения и установления регулярного режима [2] позволяет приближенно считать, что этот процесс можно мысленно разбить на ряд стадий, в каждой из которых имеет место регулярный режим охлаждения, соответствующий постоянному коэффициенту теплоотдачи, равному его значению в конце предыдущей стадии. Иными словами, можно заменить непрерывную функцию  $\alpha(t)$  некоторой ступенчатой функцией: такой, что коэффициент теплоотдачи остается постоянным на небольшом интервале изменения температуры, протяженность которого во времени значительно больше времени установления регулярного режима при текущем значении коэффициента теплоотдачи. Назовем такой режим охлаждения образца квазирегулярным.

В этом случае процесс охлаждения образца можно представить в виде последовательности регулярных режимов, каждый из которых происходит при своем постоянном  $\alpha$ . Начальное значение  $\alpha$  соответствует начальной температуре нагретого образца. Считая его постоянным, находим температуру через некоторый промежуток времени, полагая, что сразу имеет место регулярный режим охлаждения. Затем по кривой зависимости  $\alpha$  от температуры (1) находим новое значение коэффициента теплоотдачи и опять считаем процесс охлаждения регулярным, но уже с новым коэффициентом теплоотдачи и т.д.

Проведем исследование квазирегулярного режима охлаждения на основе уравнения теплопроводности в безразмерной форме:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} = \frac{\partial \Theta}{\partial \eta} \quad (2)$$

с граничными условиями:  
при  $\xi = -1/2$

$$-\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = Bi \Theta, \quad (3)$$

при  $\xi = 1/2$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = Bi \Theta. \quad (4)$$

Зависимость критерия  $Bi$  от температуры дается формулой:

$$Bi = \bar{Bi}(1 + b\xi). \quad (5)$$

В уравнениях (2)...(4):

$$\xi = \frac{x}{\delta}, \quad \eta = \frac{a\tau}{\delta^2},$$

где  $\delta$  – толщина образца;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала;  $x$  – расстояние до границы вдоль нормали к поверхности образца;  $\tau$  – промежуток времени с начала процесса охлаждения.

Когда  $Bi = \text{const}$  система уравнений (2)...(4) имеет решение:

$$\Theta = \Theta_0 \cos(p\xi)e^{-m\eta}, \quad (6)$$

где  $m = p^2$ ;  $p$  – первый корень уравнения:

$$\text{tg} \frac{p_i}{2} = \frac{Bi}{p_i}. \quad (7)$$

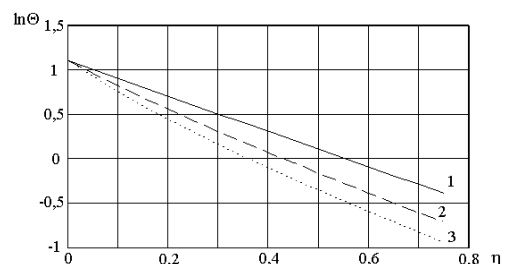


Рис. 1

На рис.1, где кривая 1 –  $b=0$ ; 2 –  $b=0,2$ ; 3 –  $b=0,4$ , приведены зависимости логарифма температуры поверхности образца от времени  $\eta$ , полученные следующим образом. Считалось, что в начальный момент времени  $\eta = 0$  температура поверхности  $\theta = 3$ . Из уравнения (5) определялся при  $\theta = 3$  критерий  $Bi$ , решалось уравнение (7), находилось  $r$ , а затем  $m$ . Далее на промежутке времени  $\Delta\eta \ll 1$  принимался регулярный режим охлаждения (6). Спустя  $\Delta\eta$ , вычислялась новая температура и новое значение критерия  $Bi$ . Затем расчет повторялся с этими новыми значениями. Вычисления выполнены при  $\bar{Bi} = 1,2$ ;  $b = 0; 0,2; 0,4$ . Из рис. 1 видно, что хотя режим охлаждения в случае зависимости (1) не является регулярным, отступление от регулярного режима состоит в коррекции зависимости темпа охлаждения от времени:

$$m(\eta) = m(1 - \mu\eta).$$

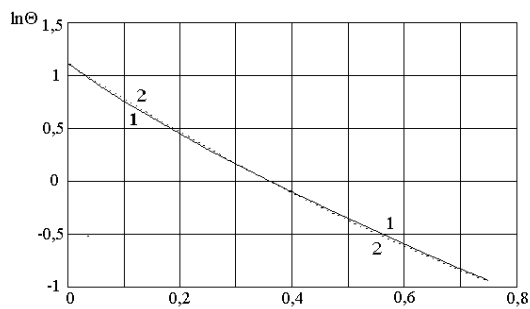


Рис. 2

Кривая (2) на рис. 2 построена исходя из зависимости:

$$\Theta = \Theta_0 \exp\{-m(1 - \mu\eta)\eta\},$$

при  $m = 3,375$ ,  $\mu = 0,2518$ .

Сравнивая кривые, видим, что квазирегулярный режим охлаждения обладает такой же общностью, что и регулярный режим, но уже определяется двумя параметрами  $m$  и  $\mu$ , то есть темпом охлаждения  $m$  и падением темпа охлаждения  $\mu$ . Связь этих параметров, полученная в результате выполнения серии расчетов, определяется табл. 1 и 2. С помощью этих таблиц, зная зависимость коэффициента теплоотдачи от

температуры, можно найти, как зависит темп охлаждения образца от времени и обратно.

Таблица 1

$Bi$	$b$					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1,0	1,9004	2,0798	2,4031	2,6879	2,9419	3,1707
1,1	2,0530	2,2405	2,5763	2,8702	3,1308	3,3604
1,2	2,2002	2,3945	2,7411	3,0424	3,3085	3,5461
1,3	2,3421	2,5428	2,8982	3,2057	3,4759	3,7165
1,4	2,4792	2,6851	3,0481	3,3605	3,6342	3,8769
1,5	2,6116	2,8219	3,1914	3,5078	3,7839	4,0282

Таблица 2

$Bi$	$b$					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1,0	0,0493	0,0889	0,1489	0,1925	0,2257	0,2521
1,1	0,0499	0,0897	0,1497	0,1930	0,2260	0,2520
1,2	0,0501	0,0900	0,1498	0,1928	0,2255	0,2512
1,3	0,0502	0,0900	0,1495	0,1922	0,2245	0,2498
1,4	0,0501	0,0898	0,1488	0,1911	0,2230	0,2480
1,5	0,0499	0,0893	0,1479	0,1897	0,2212	0,2459

Экспериментальная проверка теории квазирегулярного режима осуществлялась на установке, состоящей из сушильного шкафа, стойки для крепления рамки с тканью в вертикальном положении и оптического пирометра, сигнал с которого поступал на ЭВМ, обрабатывался и выводился на экран дисплея. В качестве материала был взят образец из технического войлока в виде плоского диска толщиной  $\delta = 6$  мм и диаметром  $D = 140$  мм. Образец с помощью четырех ниток крепился к углам плоской металлической рамки с небольшим натяжением, обеспечивающим его плоскую форму. Для выбранного материала известны коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,047$  Вт/(м·К); плотность  $\rho = 270$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость сухой шерсти  $\bar{c}_p = 1,36 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Металлическая рамка с образцом после длительного нахождения в помещении помещалась в сушильный шкаф, регулятор температуры которого устанавливался на делении  $80^\circ\text{C}$ , и выдерживалась в течение примерно одного часа. Затем рамка с образцом материала быстро вынималась ( $\approx 4 \dots 6$  сек.) и ставилась вертикально перед оптическим пирометром так, что температура измерялась в центре диска.

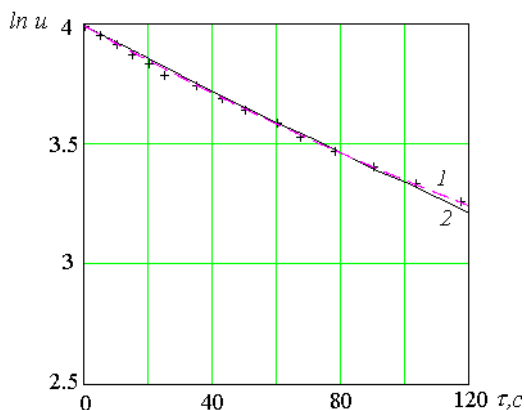


Рис. 3

График зависимости температуры  $u$  от времени фиксировался на экране дисплея и в памяти ПК. Типичный результат опыта изображен на рис.3 крестиками. Сплошная кривая 1 – зависимость логарифма относительной температуры от времени, построенная по формуле

$$\ln u = \ln u_0 - m(1 - \mu\tau)\tau,$$

при  $m = 0,0074$ ,  $\mu = 0,0013$ .

Из рис. 3 видно, что режим охлаждения образца из технического войлока описывается зависимостью от времени, характерной для квазирегулярного режима охлаждения. В рассматриваемом интервале температур от 40 до 100° С суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_R,$$

для гладкой поверхности исследуемого материала с достаточной для анализа результатов эксперимента точностью он описывается линейной зависимостью от температуры:

$$\alpha = 7,75 + 0,065t$$

в единицах Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура входит в формулу в градусах Цельсия. Соответствующий этой зависимости результат расчета кривой охлаждения образца по теории квазирегулярного режима представлен на рис. 3 сплошной линией (кривая 2). Крестиками изображены результаты эксперимента. Совпадение теории с эксперимен-

том вполне удовлетворительное.

При расчете кривых 2,3 нужно знать теплоемкость материала, из которого изготовлен образец. Удельная теплоемкость войлока, хранящегося в обычных условиях при комнатной температуре, как и любого материала из шерсти [3], зависит от его влагосодержания  $W$ :

$$W = \frac{M}{M_c},$$

где  $M$  – масса сорбированной влаги;  $M_c$  – масса сухого материала, и может быть вычислена по формуле

$$c_p = \frac{\bar{c}_p + Wc_{p,v}}{1 + W},$$

где  $c_{p,v}$  – удельная теплоемкость воды.

Влагосодержание является единственным неизвестным параметром. Согласно [3] его величина при обычных условиях хранения изделий из шерсти меняется в пределах 0,15...0,17. Процесс сушки (обезвоживания) образца достаточно длительный и при принятом времени нагрева ( $\approx 1$  час) в сушильном шкафу образца влагосодержание его существенно не изменится. Наилучшее совпадение теоретической кривой с экспериментальными данными достигалось при влагосодержании  $W=16,7\%$ .

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили основные положения теории и определили область изменения температур, в которой по параметрам кривой охлаждения ( $m, \mu$ ) можно искать теплофизические постоянные материалов, из которых изготовлен образец.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: ГТТИ, 1954.
2. Соколовская Т.С. //Химические волокна. – 2005, № 1. С.54...56.
3. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности: Учеб. для вузов/ Ганин Е.А., Корнеев С.Д., Корнюхин И.П., Щербаков В.И. – М.: Легпромбытиздат, 1989.

Рекомендована кафедрой физики. Поступила 01.12.06.