

# Прикладні аспекти: фізико-хімічні вимірювання

УДК 389.001.4

А.А. Абдукаюмов, Р.Р. Джаббаров, О.Ш. Хахимов

Научно-исследовательский институт стандартизации, метрологии и сертификации,  
Ташкент, Республика Узбекистан

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН

Приведены экспериментальные результаты исследования зависимости теплопроводности влажных трикотажных полотен от температуры и рассмотрены вопросы оценки неопределенности методики измерения.

**Ключевые слова:** экспериментальный результат, зависимость, теплопроводность, влажный, трикотажное полотно, температура, неопределенность, методика, измерение.

### Введение

Теплозащитные свойства одежды, как известно, изменяются в зависимости от целого ряда факторов, в том числе от влажности и температуры. С повышением содержания влаги в этих материалах их теплопроводность имеют тенденцию к возрастанию. Теплофизические исследования влажных текстильных материалов, практически, не проводились. Такие исследования отличаются трудоемкостью и сравнительно невысокой точностью.

### Основной материал

Наличие влажности в ткани приводит к увеличению их теплопроводности. Теплопроводность текстильных материалов увеличивается также с повышением температуры.

Зависимости теплопроводности текстильных материалов от температуры выражаются известным линейным уравнением

$$\lambda_T = \lambda_0 + \beta T, \quad (1)$$

где  $\lambda_T$ ,  $\lambda_0$  – коэффициенты теплопроводности при температуре  $T$  и  $T = 0$  °С,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\beta$  – эмпирический коэффициент,  $W/(m \cdot K^2)$ ;  $T$  – температура, °С.

С целью определения этих коэффициентов и уточнения уравнения (1), описываемые зависимости теплопроводности от температуры для трикотажного полотна артикула 31 по ГОСТ 28554 [1], нами проведены соответствующие измерения теплопроводности и обработка полученных результатов.

Нами, впервые в отечественной практике, оценены неопределенность измерения теплопроводности упомянутого трикотажного полотна в диапазоне температур от 10 до 100 °С, и влажности от 0 до 36% (табл. 1). Измерения проведены на установке ИТП–300, разработанной Отделом теплофизики Академии наук Республики Узбекистан.

Обработка приведенных в табл. 1 эксперимен-

тальных данных осуществлена методом обработки результатов совместных измерений [2]. В качестве функций, описываемые зависимости теплопроводности от влажности и температуры, нами использованы полиномы третьей ( $m = 2$ ) степени

$$\lambda_{T,k} = \lambda_0 + \beta_1 T_k + \beta_2 T_k^2, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

С целью определения параметров (значений  $\lambda_{T,k}$ ,  $\lambda_0$  и коэффициентов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) этой (2) зависимости, невязки  $\delta_k$ , т.е. оценки степени отклонения экспериментальных значений  $\lambda_k$  (см. таблицу 1) теплопроводности от расчетных  $\lambda_{T,k}$  (по предполагаемой функциональной зависимости (2)), неопределенности нахождения значений  $\lambda_{T,k}$ ,  $\lambda_0$  и коэффициентов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  в заданных экспериментальных точках  $T_k$  условная система уравнений (2) приведена к нормальной

$$\begin{cases} [\lambda_T] = n\hat{\lambda}_0 + [T]\hat{\beta}_1 + [T^2]\hat{\beta}_2; \\ [\lambda_T T] = [T]\hat{\lambda}_0 + [T^2]\hat{\beta}_1 + [T^3]\hat{\beta}_2; \\ [\lambda_T T^2] = [T^2]\hat{\lambda}_0 + [T^3]\hat{\beta}_1 + [T^4]\hat{\beta}_2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } [T^m \lambda_T] = \sum_{k=1}^n T_k^m \lambda_{T,k}, \quad [T^m] = \sum_{k=1}^n T_k^m,$$

$$[T] = \sum_{k=1}^n T_k, \quad - \text{обозначения, введенные Гауссом.}$$

Систему нормальных уравнений (3) решена с помощью определителей.

На рис. 1 изображены результаты экспериментальных измерений теплопроводности трикотажного полотна артикула 31 по ГОСТ 28554 [1]. На этом рисунке представлены также теоретические кривые зависимости теплопроводности от влажности и температуры, полученные в результате обработки экспериментальных данных, используя полиномы третьей степени. Параметры этой полиномы также изображены на рис. 1 и представлены в табл. 2.

Таблица 1

Экспериментальные  $\lambda_T$  и рассчитанные  $\lambda_{T,k}$  значений теплопроводности трикотажного полотна артикула 31 по ГОСТ 28554 и значения стандартной суммарной неопределенности  $u_c(\lambda_{T,k})$  нахождения  $\lambda_{T,k}$  в заданной точке  $T_k$  по полученной аналитической зависимости,  $mW/(m \cdot K)$

Влажность, %											
0				10,6				15,4			
$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$	$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$	$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$
11,49	46,7	46,8	0,493	10,82	52,3	52,5	2,147	10,45	62,1	62,1	0,692
29,89	48,1	48,1	0,324	29,78	56,0	55,0	1,382	29,90	63,9	63,9	0,445
39,78	49,4	49,0	0,342	40,52	55,3	56,5	1,437	40,32	65,7	65,3	0,458
57,67	50,6	51,3	0,259	56,43	56,8	58,6	1,138	55,83	66,7	67,7	0,364
60,85	51,9	51,8	0,267	60,40	57,5	59,2	1,153	59,86	69,0	68,4	0,370
68,8	53,4	53,1	0,413	70,21	59,8	60,6	1,893	69,69	70,4	70,3	0,609
26,2				30,8				36,4			
$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$	$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$	$T_k, ^\circ C$	$\lambda_k$	$\lambda_{T,k}$	$u_c(\lambda_{T,k})$
9,8	76,6	76,4	1,037	10,88	82,2	82,79	3,241	12,07	87,8	87,36	0,936
29,84	78,6	78,9	0,643	29,84	84,7	82,30	2,024	29,85	88,1	89,34	0,585
38,86	80,4	80,5	0,654	40,7	81,7	83,23	2,115	39,8	91,6	91,23	0,613
54,78	82,9	83,8	0,545	55,07	82,5	85,80	1,787	53,59	95,2	94,80	0,519
55,82	85,6	84,1	0,544	61,81	91,3	87,53	1,773	60,37	97,6	96,95	0,516
69,8	87,4	87,7	0,965	72,43	90,2	90,95	2,941	69,93	99,8	100,43	0,843

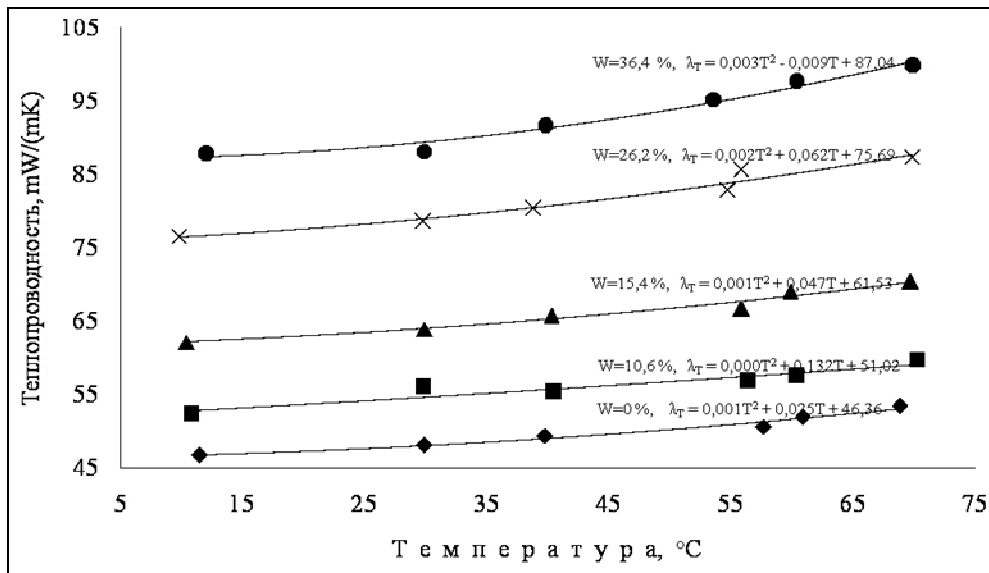


Рис. 1. Теплопроводность трикотажного полотна артикула 31 по ГОСТ 28554

Суммарные неопределенности  $u_c(\hat{\lambda}_0)$ ,  $u_c(\hat{\beta}_1)$ ,  $u_c(\hat{\beta}_2)$  нахождения (оценок) величин  $\lambda_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  (см. табл. 2), найденных как результат совместных измерений, вычислены по формулам

$$u_c(\hat{\lambda}_0) = \sqrt{D_{11}/D} \cdot u(\delta); \quad u_c(\hat{\beta}_1) = \sqrt{D_{22}/D} \cdot u(\delta);$$

$$u_c(\hat{\beta}_2) = \sqrt{D_{33}/D} \cdot u(\delta), \quad (4)$$

где  $D_{11}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{33}$ , т.е.  $D_{(i+1)(j+1)}$  – алгебраическое дополнение элементов главного определителя  $D$ ;  $u(\delta)$  – стандартная неопределенность невязки, оцениваемая по типу А по формуле

$$u(\delta) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \delta_k^2 / (n-m-1)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \delta_k^2 / (n-3)}, \quad (5)$$

причем  $\delta_k$  вычислены подстановкой в каждое услов-

ное уравнение (2) оценок искомых величин  $\lambda_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ . Значения  $\delta_k$  также представлены в табл. 2.

Расширенные неопределенности  $\hat{\lambda}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$  нахождения вычислены по формуле

$$U(\hat{\lambda}_0) = k \cdot u_c(\hat{\lambda}_0), \quad U(\hat{\beta}_1) = k \cdot u_c(\hat{\beta}_1),$$

$$U(\hat{\beta}_2) = k \cdot u_c(\hat{\beta}_2), \quad (6)$$

где коэффициент охвата  $k$  находится из распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $(n - m - 1) = 3$  и заданному уровню доверия  $P = 0,95$ . Суммарная стандартная неопределенность  $u_c(\lambda_{T,k})$  нахождения  $\lambda_{T,k}$  в заданной точке  $T_k$  по полученной аналитической зависимости с учетом попарной корреляции между оценками параметров  $\lambda_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  (см. табл. 1), определялась по формуле

Таблиця 2

Параметри залежності теплопровідності  $\lambda$  трикотажного полотна артикула 31 від вологості та температури, оцінки ступеня відхилення  $\delta_k$  експериментальної залежності від аналітичної, неопределенності  $u(\delta)$ ,  $u_c(\hat{\lambda}_0)$ ,  $u_c(\hat{\beta}_1)$ ,  $u_c(\hat{\beta}_2)$ , коефіцієнтів кореляції  $r(\lambda_0, \beta_1)$ ,  $r(\lambda_0, \beta_2)$ ,  $r(\beta_1, \beta_2)$ , розширених неопределенностей  $U(\hat{\lambda}_0)$ ,  $U(\hat{\beta}_1)$ ,  $U(\hat{\beta}_2)$

Параметри	Вологість, %					
	0	10,6	15,4	26,2	30,8	36,4
$\hat{\lambda}_0$ , mW/(m·K)	46,364	51,015	61,535	75,689	84,279	87,043
$\hat{\beta}_1$ , mW/(m·K <sup>2</sup> )	0,025	0,132	0,047	0,062	-0,177	-0,009
$\hat{\beta}_2$ , mW/(m·K <sup>3</sup> )	0,001	0,00005	0,001	0,002	0,004	0,003
$\delta_k^2$ , [mW/(m·K)] <sup>2</sup>	0,774	14,791	1,527	3,439	34,062	2,841
$u(\delta)$ , mW/(m·K)	0,508	2,220	0,713	1,071	3,370	0,973
$u_c(\hat{\lambda}_0)$ , mW/(m·K)	0,951	3,880	1,223	1,743	5,743	1,827
$u_c(\hat{\beta}_1)$ , mW/(m·K <sup>2</sup> )	0,054	0,216	0,069	0,097	0,309	0,099
$u_c(\hat{\beta}_2)$ , mW/(m·K <sup>3</sup> )	0,001	0,003	0,001	0,001	0,004	0,001
$u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_1)$ , mW <sup>2</sup> /(m <sup>2</sup> ·K <sup>3</sup> )	-0,047	-0,765	-0,076	-0,153	-1,616	-0,168
$u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_2)$ , mW <sup>2</sup> /(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )	0,001	0,008	0,001	0,002	0,017	0,002
$u(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$ , mW <sup>2</sup> /(m <sup>2</sup> ·K <sup>5</sup> )	-0,00003	-0,0006	-0,00006	-0,0001	-0,001	-0,0001
$r(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_1)$	-0,922	-0,912	-0,908	-0,901	-0,911	-0,925
$r(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_2)$	0,843	0,822	0,814	0,796	0,817	0,841
$r(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$	-0,981	-0,978	-0,977	-0,973	-0,976	-0,979
$U(\hat{\lambda}_0)$ , mW/(m·K)	2,645	10,786	3,399	4,847	15,965	5,078
$U(\hat{\beta}_1)$ , mW/(m·K <sup>2</sup> )	0,150	0,601	0,191	0,270	0,858	0,276
$U(\hat{\beta}_2)$ , mW/(m·K <sup>3</sup> )	0,002	0,007	0,002	0,003	0,010	0,003

$$u_c(\lambda_{T,k}) = \sqrt{u_c^2(\hat{\lambda}_0) + T_k^2 \cdot u_c^2(\hat{\beta}_1) + T_k^4 \cdot u_c^2(\hat{\beta}_2) + 2 \left[ T_k \cdot u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_1) + T_k^2 \cdot u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_2) + T_k^2 \cdot u(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_1) + T_k^3 \cdot u(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) \right]}, \quad (7)$$

де  $u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_1) = (D_{12}/D) \cdot u^2(\delta)$ ,  $u(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) = (D_{13}/D) \cdot u^2(\delta)$ ,

$u(\hat{\lambda}_0, \hat{\beta}_2) = (D_{13}/D) \cdot u^2(\delta)$  – коефіцієнти коваріації між параметрами  $\lambda_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ;  $D_{12}$ ,  $D_{13}$ ,  $D_{23}$ , т.е.  $D_{(i+1)(j+1)}$  – алгебраїчне доповнення елементів головного определителя  $D$ .

В заключенні відзначимо, що найменша неопределенність вимірювання теплопровідності трикотажного полотна артикула 31 по ГОСТ 28554, як це випливає з експериментів та теоретичних розрахунків, спостерігається в діапазоні температур від 50 до 60 °С.

### Список литературы

1. ГОСТ 28554-90 Полотно трикотажное. Общие технические условия.
2. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.

Поступила в редколлегию 16.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

### НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОЛОГИХ ТРИКОТАЖНИХ ПОЛОТЕН

А.А. Абдукаюмов, Р.Р. Джаббаров, О.Ш. Хахимов

У роботі приведені експериментальні результати дослідження залежності теплопровідності вологих трикотажних полотен від температури і розглянуті питання оцінки невизначеності методики вимірювання.

**Ключові слова:** експериментальний, результат, залежність, теплопровідність, вологий, трикотажне, полотно, температура, невизначеність, методика, вимірювання.

**UNCERTAINTY OF A MEASURING TECHNIQUE OF HEAT CONDUCTIVITY OF DAMP KNITTED LINENS**

A.A. Abdukayumov, R.R. Djabbarov, O.Sh. Khakimov

*Experimental results of heat conductivity dependence research of damp knitted linens on temperature are given in work and considered questions of uncertainty evaluation of a measuring technique are considered.*

**Keywords:** *experimental result, dependence, heat conductivity, damp, knitted linen, temperature, and uncertainty, a technique, measurement.*