

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВОК НА СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

**С. В. ПОНОМАРЕВ, А. Г. ДИВИН, П. В. БАЛАБАНОВ, А. В. ГУРОВ,
Д. А. ДИВИНА, А. Е. ПОСТНИКОВА**

*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия,
e-mail: kafedra@uks.tstu.ru*

Рассмотрены рекомендации по разработке и практическому применению предложенной методики введения поправок в результаты измерений теплофизических свойств веществ.

Ключевые слова: систематическая погрешность, поправка, методика введения.

Recommendations for the development and practical application of the proposed methodology of introduction of amendments into the results of measurements of thermophysical properties are discussed.

Key words: systematic error, amendments, introduction methodology.

При проектировании и модернизации теплофизических методов, приборов и средств измерений рекомендуется использовать так называемые инструменты и методы менеджмента качества [1–3]. В [3] рассмотрено применение одного из таких инструментов (а именно, методология решения проблем) для улучшения метрологических характеристик разрабатываемых методов и измерительных устройств (ИУ) – введение поправок на систематические погрешности измерения искомых теплофизических свойств (ТФС) веществ [3].

В соответствии с рекомендациями [4] поправка – это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения (или хотя бы уменьшения) составляющей систематической погрешности.

Формы математических зависимостей, используемых при введении поправок. В настоящее время для введения поправок на систематические погрешности измерений используются следующие варианты математических зависимостей [4–8]:

первая форма введения поправок [4, 5]:

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} + \Delta(\varphi_{\text{изм}}), \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{изм}}$, $\varphi_{\text{исп}}$ – неисправленный результат измерения и исправленное (после введения поправки) значение физической величины; $\Delta(\varphi_{\text{изм}})$ – аддитивная поправка, численно равная взятой с обратным знаком систематической погрешности при конкретном неисправленном измеренном значении $\varphi_{\text{изм}}$;

вторая форма введения поправок:

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} m(\varphi_{\text{изм}}), \quad (2)$$

где $m(\varphi_{\text{изм}})$ – поправочная функция, после умножения на которую $\varphi_{\text{изм}}$ преобразуется в $\varphi_{\text{исп}}$;

третья форма введения поправок [6, 7]:

$$\varphi_{\text{исп}} = f(\varphi_{\text{изм}}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots), \quad (3)$$

где $f(\varphi_{\text{изм}})$ – функция, зависящая от $\varphi_{\text{изм}}$ и параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, часто задаваемая в виде полинома

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 \varphi_{\text{изм}}^2 + \alpha_3 \varphi_{\text{изм}}^3 + \dots, \quad (4)$$

позволяющего вычислить $\varphi_{\text{исп}}$ по $\varphi_{\text{изм}}$.

Следует отметить, что формулы (1) – (3) легко можно преобразовать одну в другую. Например, после вынесения за скобку величины $\varphi_{\text{изм}}$ в (1) получаем

$$\varphi_{\text{исп}} = \varphi_{\text{изм}} \left[1 + \Delta(\varphi_{\text{изм}}) / \varphi_{\text{изм}} \right], \quad (5)$$

откуда следует, что в (5) выражение, стоящее в квадратных скобках, совпадает с функцией $m(\varphi_{\text{изм}}) = 1 + \Delta(\varphi_{\text{изм}}) / \varphi_{\text{изм}}$, использованной в правой части (2). При этом (3) представляет наиболее общую запись математических зависимостей для введения поправок. Именно зависимости (3), (4) широко применяют при проектировании и разработке теплофизических методов и средств измерений в Тамбовском государственном техническом университете и используются в качестве основы в данной статье.

Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерений ТФС. При разработке методики введения поправок один из главных результатов состоит в определении значений параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ расчетной зависимости (3). Рекомендуемый порядок разработки методики введения поправок на систематические погрешности измерений ТФС проиллюстрирован на рисунке.

В соответствии с рекомендациями [1–3] после определения проблемы и последовательности действий, направленных на улучшение метрологических характеристик, приступают к осуществлению запланированного усовершенствования [3]:

решают математическую задачу оптимизации разрабатываемого метода и ИУ;

выбирают оптимальные режимные параметры метода измерения и рациональные конструкционные размеры ИУ;

разрабатывают сборочный чертеж и чертежи деталей ИУ;

изготавливают детали, приобретают необходимые комплектующие изделия, осуществляют сборку и отладку ИУ;

разрабатывают и отлаживают базовый вариант программного обеспечения проектируемой системы;

объединяют изготовленное ИУ и разработанное программное обеспечение в единую информационно-измерительную систему (ИИС) и отлаживают ее;

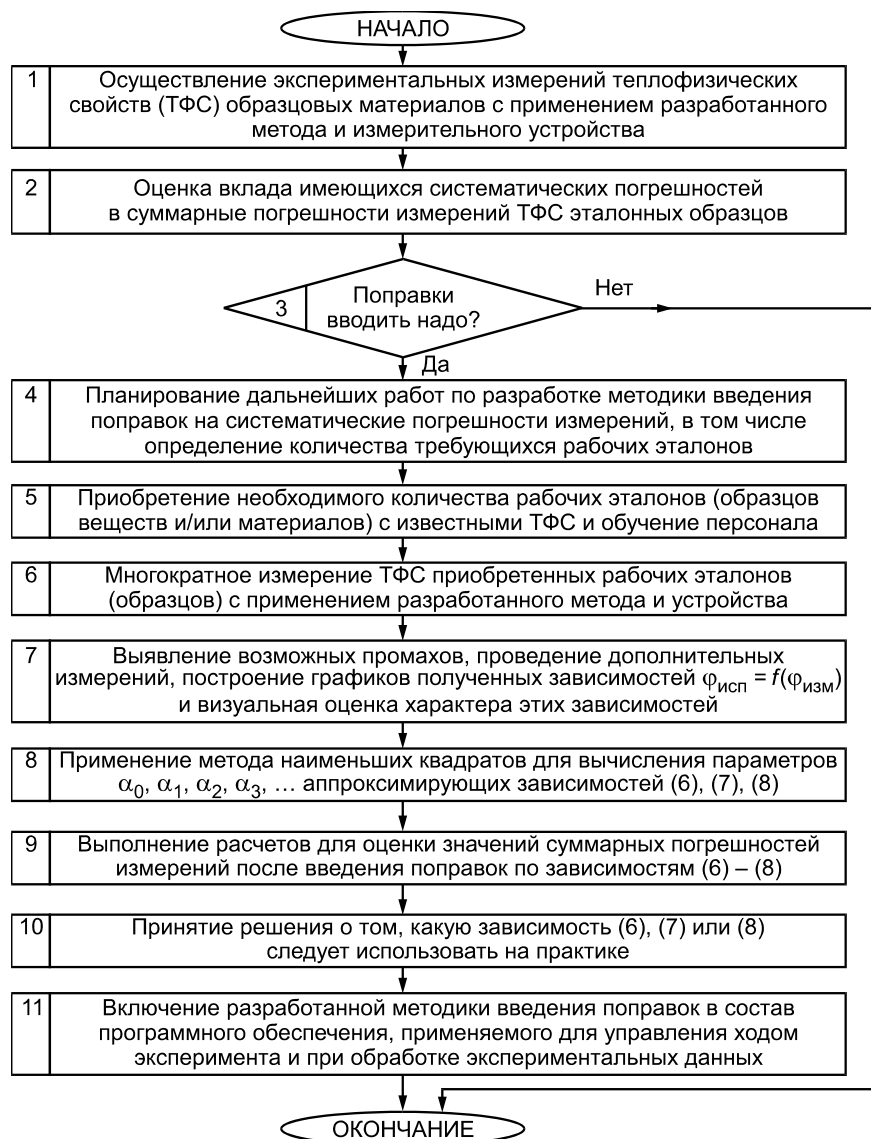
с использованием созданной ИИС проводят экспериментальное измерение ТФС рабочих эталонов – образцов веществ и материалов с известными свойствами (блок 1 на рисунке);

путем сравнения полученных результатов измерений с известными значениями ТФС рабочих эталонов оценивают вклад (блок 2) имеющихся систематических погрешностей в суммарные погрешности изменений ТФС эталонных образцов;

если вклад систематических погрешностей превышает 20–30 % суммарных погрешностей измерений, то принимают решение о целесообразности разработки методики введения поправок на систематические погрешности (блок 3);

приступают к планированию дальнейших действий (блок 4), а затем к выполнению последующей работы, основные этапы которой отражают блоки 5–11.

Рассмотрим подробнее содержание и результаты работы блоков 5–11. При планировании работ по разработке методики (блок 4) должны быть идентифицированы потенциальные барьеры (препятствия) и предусмотрены необходимые предупреждающие действия [1–3];



Процедура разработки методики введения поправок на систематические погрешности измерений теплофизических свойств веществ

выделены и приобретены все необходимые ресурсы для осуществления плана дальнейших действий, в частности, выяснены наименования и количества рабочих эталонов (образцов веществ и материалов с известными значениями ТФС), а также потребность в обучении и тренинге на рабочих местах персонала, вовлеченного в выполнение запланированной работы и др.

После приобретения требуемых рабочих эталонов и обучения персонала (блок 5) в соответствии с информацией, полученной от блока 6, приступают к многократным измерениям ТФС с применением разработанного метода и ИС. На этом этапе работы желательно обеспечить пяти-десятикратные повторные измерения ТФС с каждым используемым рабочим эталоном при полной перезакладке этих эталонов (образцов веществ) в измерительном устройстве ИИС.

По завершении намеченной программы экспериментальных измерений ТФС рабочих эталонов выявляют возможные промахи в проделанной работе [4–8]. После удаления промахов, возможно, потребуются дополнительные эксперименты. Сформировав необходимый массив экспериментальных данных, осуществляют (блок 7) построение графиков полученных зависимостей (3) и визуально оценивают их характер.

На следующем этапе (блок 8) с применением метода наименьших квадратов вычисляют параметры $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ аппроксимирующих полиномов первой, второй или третьей степеней: при использовании двух, трех или четырех рабочих эталонов, соответственно:

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}}, \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}}^2), \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{исп}} = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_{\text{изм}} + \alpha_2 (\varphi_{\text{изм}}^2) + \alpha_3 (\varphi_{\text{изм}}^3). \quad (8)$$

Опыт практической работы по выполнению расчетов для оценивания суммарных погрешностей (блок 9) показал, что использование полиномов четвертой, пятой и более высоких степеней в большинстве случаев нецелесообразно по следующим причинам:

при проведении экспериментов редко применяют больше трех-четырех рабочих эталонов;

при использовании полиномов выше третьей и степени получаемые в результате аппроксимации зависимости вида (8), (4) имеют колебательный характер и вместо того, чтобы уменьшить суммарные погрешности измерений после введения поправок, в большинстве случаев приводят к обратным результатам (повышают суммарные погрешности в промежуточных точках диапазона измерения).

После выполнения расчетов для оценивания суммарных погрешностей измерений (блок 10) принимают решение, какая из зависимостей (6) – (8) позволяет значительно уменьшить указанные погрешности и должна быть использована при практическом применении разрабатываемой методики введения поправок. Выбранная зависимость в дальнейшем служит в качестве основы математического и алгоритмического обеспечения этой методики, и основанный на ней алгоритм вычислений включается (блок 11) в состав программного обеспечения ИИС, применяемого как для управления ходом эксперимента, так и при обработке экспериментальных данных.

Было принято решение о возможности применения в качестве рабочих эталонов следующих жидкостей: дистиллированной воды, глицерина и 95 %-ного раствора этилового спирта. Были проведены [7] пятикратные измерения их теплопроводности $\lambda_{\text{изм}}$ и температуропроводности $a_{\text{изм}}$ (табл. 1–4). Здесь также приведены точные значения λ^T , a^T указанных жидкостей [9].

Выполненная по рекомендациям [5] проверка показала, что приведенные в табл. 1–4 экспериментальные данные не содержат грубых ошибок (промахов). Принимая во внимание, что эти данные были получены с использованием трех рабочих эталонов, вычисляли параметры α_0 , α_1 зависимости (6) и α_0 , α_1 , α_2 зависимости (7), которые представлены соответственно в табл. 1 – 4, где также приведены рассчитанные по приведенным ниже формулам погрешности неисправленных (до введения поправок) и исправленных (после введения поправок) результатов измерений:

$$\delta\lambda_{\text{изм}} = (\lambda_{\text{изм}} - \lambda^T) / \lambda^T, \quad \delta a_{\text{изм}} = (a_{\text{изм}} - a^T) / a^T$$

$$\delta\lambda_{\text{исп}} = (\lambda_{\text{исп}} - \lambda^T) / \lambda^T, \quad \delta a_{\text{исп}} = (a_{\text{исп}} - a^T) / a^T.$$

Полиномы (6), (7) с введенными рассчитанными параметрами α_0 , α_1 , α_2 указаны в нижних строках табл. 1–4.

В качестве величины $\Pi_{\text{исп}}$, характеризующей погрешность исправленных результатов измерений, в табл. 1 – 2 использовали средние квадратические оценки

$$\Pi_{\text{исп}} = \sqrt{\frac{1}{3n-1} \left[\sum_{i=1}^5 (\delta\lambda_{\text{в.исп } i}^2) + \sum_{i=1}^5 (\delta\lambda_{\text{г.исп } i}^2) + \sum_{i=1}^5 (\delta\lambda_{\text{сп.исп } i}^2) \right]};$$

$$\Pi_{\text{исп}} = \sqrt{\frac{1}{3n-1} \left[\sum_{i=1}^5 (\delta a_{\text{в.исп } i}^2) + \sum_{i=1}^5 (\delta a_{\text{г.исп } i}^2) + \sum_{i=1}^5 (\delta a_{\text{сп.исп } i}^2) \right]}.$$

Т а б л и ц а 1
Результаты расчетов при определении параметров α_0 , α_1 полинома первой степени (6) для введения поправок на систематические погрешности измерений теплопроводности

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ														
№ п/п	Дистиллированная вода, $\lambda_{\text{в}}^{\tau=0,59 \text{ Вт/(м·К)}}$					Глицерин, $\lambda_{\text{г}}^{\tau=0,28 \text{ Вт/(м·К)}}$					Спирт, $\lambda_{\text{сп}}^{\tau=0,18 \text{ Вт/(м·К)}}$			
	$\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{в,теор}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,теор}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{г,теор}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,теор}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{сп,теор}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,теор}}^{\tau}$ %	
1	0,621	5,25	0,589	0,315	12,50	0,283	1,06	0,205	13,89	0,173	-3,89			
2	0,622	5,42	0,589	0,311	11,07	0,279	-0,37	0,216	20,00	0,184	2,21			
3	0,625	5,93	0,593	0,315	12,50	0,283	1,06	0,210	16,67	0,178	-1,12			
4	0,623	5,59	0,591	0,314	12,14	0,282	0,69	0,214	18,89	0,182	-1,10			
5	0,618	4,75	0,586	0,311	11,07	0,279	-0,37	0,211	17,22	0,179	-0,56			
$\lambda_{\text{ср}}$	0,622	—	0,5896	0,313	—	0,2812	—	0,211	—	0,1792	—			
$\delta\lambda_{\text{ср}}$	—	5,42	—	—	11,79	—	0,4285	—	17,22	—	-0,444			
$\lambda_{\text{в,ср}} = -0,03 + 1,0\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$; $\Pi_{\text{в,ср}} = 1,327\%$														

Т а б л и ц а 2
Результаты расчетов при определении параметров α_1 , α_2 , α_3 полинома второй степени (7) для введения поправок на систематические погрешности измерений теплопроводности

№ п/п	на систематическое погрешности измерения теплопроводности													
	Дистиллированная вода, $\lambda_{\text{в}}^{\tau=0,59 \text{ Вт/(м·К)}}$					Глицерин, $\lambda_{\text{г}}^{\tau=0,28 \text{ Вт/(м·К)}}$					Спирт, $\lambda_{\text{сп}}^{\tau=0,18 \text{ Вт/(м·К)}}$			
	$\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{г,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ %	$\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ Вт/(м·К)	$\delta\lambda_{\text{сп,изм}}^{\tau}$ %
1	0,621	5,25	0,589	-0,14	0,315	12,50	0,282	0,59	0,205	13,89	0,174	-3,89		
2	0,622	5,42	0,590	0,03	0,311	11,07	0,278	-0,82	0,216	20,00	0,185	2,67		
3	0,625	5,93	0,593	0,55	0,315	12,50	0,282	0,59	0,210	16,67	0,179	-0,56		
4	0,623	5,59	0,591	0,20	0,314	12,14	0,281	0,23	0,214	18,89	0,183	1,59		
5	0,618	4,75	0,586	-0,66	0,311	11,07	0,278	-0,82	0,211	17,22	0,179	-0,02		
$\lambda_{\text{ср}}$	0,622	—	0,5896	—	0,313	—	0,2802	—	0,211	—	0,18	—		
$\delta\lambda_{\text{ср}}$	—	5,42	—	-0,034	—	11,79	—	0,714	—	17,22	—	0		
$\lambda_{\text{в,ср}} = -0,02 + 0,94\lambda_{\text{в,изм}}^{\tau} - 0,07\lambda_{\text{в,изм}}^2$; $\Pi_{\text{в,ср}} = 1,295 \%$														

Т а б л и ц а 3

Результаты расчетов при определении параметров α_0 , α_1 полинома первой степени (6) для введения поправок на систематические погрешности измерений температуропроводности

№ п/п	Дистиллированная вода, $a_{\text{в}} \cdot 10^7 = 1,48 \text{ м}^2/\text{с}$				Глицерин, $a_{\text{г}} \cdot 10^7 = 0,91 \text{ м}^2/\text{с}$				Спирт, $a_{\text{сп}} \cdot 10^7 = 0,88 \text{ м}^2/\text{с}$			
	$a_{\text{в,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{в,изм}}$, %	$a_{\text{в,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{в,исп}}$, %	$a_{\text{г,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{г,изм}}$, %	$a_{\text{г,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{г,исп}}$, %	$a_{\text{сп,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{сп,изм}}$, %	$a_{\text{сп,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{сп,исп}}$, %
1	1,54	4,05	1,43	-3,60	1,05	15,38	0,92	2,17	0,95	7,95	0,83	-5,86
2	1,66	12,16	1,55	4,62	1,06	16,48	0,94	3,29	0,96	9,09	0,84	-4,71
3	1,56	5,41	1,45	-2,23	1,07	17,58	0,95	4,4	1,01	14,77	0,89	1,05
4	1,58	6,76	1,47	-0,86	1,01	10,99	0,89	-2,28	1,01	14,77	0,89	1,05
5	1,59	7,43	1,48	-0,18	1,05	15,38	0,92	2,17	1,02	15,90	0,90	2,2
$a_{\text{ср}}$	1,586	—	1,476	—	1,048	—	0,924	—	0,99	—	0,87	—
$\delta a_{\text{ср}}$	—	7,16	—	-0,27	—	15,16	—	1,538	—	12,5	—	-1,136
$a_{\text{исп}} = -0,13 + 1,01a_{\text{изм}}$; $II_{\text{исп}3} = 3,256 \%$												

Т а б л и ц а 4

Результаты расчетов при определении параметров α_1 , α_2 , α_3 полинома второй степени (7) для введения поправок на систематические погрешности измерений температуропроводности

№ п/п	Дистиллированная вода, $a_{\text{в}} \cdot 10^7 = 1,48 \text{ м}^2/\text{с}$				Глицерин, $a_{\text{г}} \cdot 10^7 = 0,91 \text{ м}^2/\text{с}$				Спирт, $a_{\text{сп}} \cdot 10^7 = 0,88 \text{ м}^2/\text{с}$			
	$a_{\text{в,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{в,изм}}$, %	$a_{\text{в,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{в,исп}}$, %	$a_{\text{г,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{г,изм}}$, %	$a_{\text{г,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{г,исп}}$, %	$a_{\text{сп,изм}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{сп,изм}}$, %	$a_{\text{сп,исп}} \cdot 10^7$, м ² /с	$\delta a_{\text{сп,исп}}$, %
1	1,54	4,05	1,42	-3,84	1,05	15,38	0,92	1,88	0,95	7,95	0,83	-5,19
2	1,66	12,16	1,56	5,07	1,06	16,48	0,94	2,92	0,96	9,09	0,84	-4,15
3	1,56	5,41	1,44	-2,37	1,07	17,58	0,95	3,96	1,01	14,77	0,89	1,09
4	1,58	6,76	1,47	-0,90	1,01	10,99	0,89	-2,34	1,01	14,77	0,89	1,09
5	1,59	7,43	1,48	-0,16	1,05	15,38	0,92	1,88	1,02	15,90	0,90	2,16
$a_{\text{ср}}$	1,586	—	1,474	—	1,048	—	0,924	—	0,99	—	0,87	—
$\delta a_{\text{ср}}$	—	7,16	—	-0,41	—	15,16	—	1,54	—	12,5	—	-1,14
$a_{\text{исп}} = 0,1 + 0,64a_{\text{изм}} + 0,14a_{\text{изм}}^2$; $II_{\text{исп}4} = 3,104 \%$												

Из приведенных в табл. 1, 2 значений $P_{\text{исп1}}=1,327\%$ и $P_{\text{исп2}}=1,295\%$ следует, что использование полинома второй степени позволяет получать после введения поправок меньшие значения суммарных погрешностей измерений теплопроводности по сравнению с полиномом первой степени. Аналогичные выводы можно сделать из приведенных в табл. 3, 4 значений $P_{\text{исп3}}=3,256\%$, $P_{\text{исп4}}=3,104\%$ для коэффициента температуропроводности.

Приведенные выше результаты практического применения изложенных в статье рекомендаций по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерений убедительно свидетельствуют о возможности значительного снижения суммарных погрешностей измерений тепло- и температуропроводности жидкостей с использованием методов и устройств, рассмотренных в [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев С. В. и др. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: Учеб. пособие. М.: РИА «Стандарты и качество», 2005.
2. Пономарев С. В. и др. Управление качеством процессов и продукции. Кн. 2. Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах: Учеб. пособие / Под ред. С. В. Пономарева. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012.
3. Мищенко С. В. и др. Использование методологии решения проблем, инструментов и методов менеджмента качества при выполнении научных исследований // Вестник ТГТУ. 2012. № 1. С. 6–18.
4. РМГ 29–99. Метрология. Основные термины и определения.
5. Зайдель А. Н. Ошибки измерения физических величин. Л.: Наука, 1974.
6. Пономарев С. В., Дивин А. Г., Романов Р. В. Методика введения поправки в результаты измерения теплофизических свойств // Тез. докл. I Науч. конф. ТГТУ. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1994. С. 60–61.
7. Пономарев С. В., Мищенко С. В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1997.
8. Пономарев С. В. и др. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
9. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

Дата принятия 03.10.2013 г.