



**Е.В. Васильев, А.А. Игнатов, М.И. Калинин,
Л.Д. Маркин**

ИММЕРСИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭТАЛОННЫМИ ТЕРМОМЕТРАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОРПУСОМ

Применение эталонных платиновых термометров сопротивления (ТС) с металлическим корпусом для поверки и индивидуально градуируемых термопреобразователей сопротивления, а также их периодическая поверка с помощью поверочного оборудования, отличающегося от оборудования, применявшегося при первичной поверке, предполагают предварительную оценку пригодности его для обеспечения качества поверки. В первую очередь это касается обеспечения необходимых условий для компарирования термометров в термостабах и калибраторах температуры.

В связи с этим в ГОСТ 8.461-2009 на методику поверки термопреобразователей сопротивления содержится следующая рекомендация: «Эталонный термометр и поверяемый ТС помещают в рабочий объем термостата на глубину не менее минимальной глубины погружения, указанной в паспорте на ТС. Если монтажная длина поверяемых ТС более минимальной глубины погружения эталонного термометра или равна ей, то чувствительные элементы (ЧЭ) всех ТС должны находиться на одном уровне» (п. 10.3.1.1). При использовании в качестве средств поверки калибраторов температуры в указанном стандарте предусмотрено погружение ТС с диаметром не более 6 мм на глубину, в 15 раз превышающую его диаметр плюс длина чувствительного элемента термометра.

В эксплуатационной документации на эталонный 3-го разряда термометр типа ЭТС-100 с металлическим корпусом предусмотрено погружение его в измеряемую среду на глубину не менее 300 мм без уточнения типа измеряемой среды. Такая же глубина погружения предусмотрена в

ГОСТ Р 8.571-98 на методику поверки эталонных платиновых термометров сопротивления при поверке эталонных ТС 2-го разряда методом непосредственного сличения.

Однако не для всех эталонных ТС в технической документации нормируется минимальная глубина погружения в термостаты с жидкими теплоносителями или в калибраторы температуры с твердотельными термостатами. Например, в методике поверки эталонных платиновых термометров сопротивления виброустойчивого исполнения 2-го и 3-го разрядов типа ПТСВ с металлическим корпусом отсутствуют рекомендации по глубине погружения в измеряемую среду в процессе поверки и калибровки их методом непосредственного сличения с эталонным ТС.

Теоретические оценки ошибок, обусловленных отводом тепла по металлическому корпусу рабочего ТС, впервые были предложены немецкими исследователями О. Кноблах и К. Генки при измерении температуры среды в трубопроводах [1]. Работы этих авторов показали важность понимания источников ошибок измерений температуры, возникающих вследствие неправильного применения ТС на промышленных трубопроводах.

В настоящее время для повышения качества поверки и градуировки термометров с металлическим корпусом важной задачей становится разработка метода оценки ранее не учитываемой иммерсионной составляющей неопределенности измерений температуры. Термин «иммерсионная составляющая» заимствован из иностранной литературы [2], в которой он используется для обозначения погрешности, возникающей вследствие

отвода тепла по корпусу ТС стержневого типа.

В отечественных и зарубежных публикациях [1], [3]-[5] предложены методы, позволяющие оценить эту иммерсионную составляющую погрешности термометра сопротивления, установленно-го на трубопроводе. На рис. 1 изображена схема идеализированного термоприемника длины L при наличии выступающей части длины l_2 и распределение $t(x)$ температуры вдоль него, заимствованная из книги В.П. Преображенского [6]. Чувствительный элемент термоприемника имеет длину $l_{ч.э.}$, внешняя среда имеет температуру $t_в$.

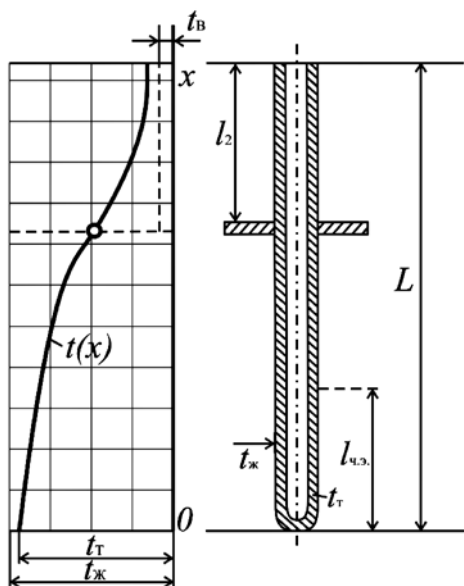


Рис. 1. Схематическое изображение ТС стержневого типа с выступающей частью и распределение температуры вдоль него

Наличие разности между температурами измеряемой среды $t_ж$ и рабочей части термометра $t_т$ свидетельствует о том, что чувствительный элемент, помещенный в металлический корпус, не принимает температуру измеряемой среды из-за отвода тепла вдоль его корпуса. Существующая разность между ними представляет собой ошибку измерений температуры, которая зависит от материала и толщины стенок корпуса, а также от величины выступающей части ТС.

Математические модели и расчеты погрешностей технических измерений температуры в промышленности рабочими ТС, установленными на трубопроводах [3], [4], [6], позволили разработать параметрический ряд монтажных частей ТС для трубопроводов разных диаметров и различных сред, пользуясь которыми можно существенно уменьшить погрешность, связанную с отводом тепла по корпусу ТС.

В работе [5] получена теоретическая оценка погрешности измерения температуры эталонным ТС с кварцевым корпусом, возникающая за счет отвода тепла вдоль корпуса термометра. На рис. 2 изображена схема установки эталонного ТС с кварцевым корпусом в ампулу, применявшаяся для численного расчета на компьютере погрешности измерения температуры за счет отвода тепла при градуировке ТС в реперных точках [5]. При расчете стержень термометра разбивался на четыре участка I, II, III, IV с длинами l_1, l_2, l_3, l_4 , причем на участках II, III, IV происходил теплообмен по закону Ньютона с постоянными коэффициентами $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ со средами, имеющими температуры $T_{ср2}, T_{ср3}, T_{ср4}$. На участке I теплообменом со средой пренебрегали. Чувствительный элемент термометра в рассматриваемой модели — это участок AB.

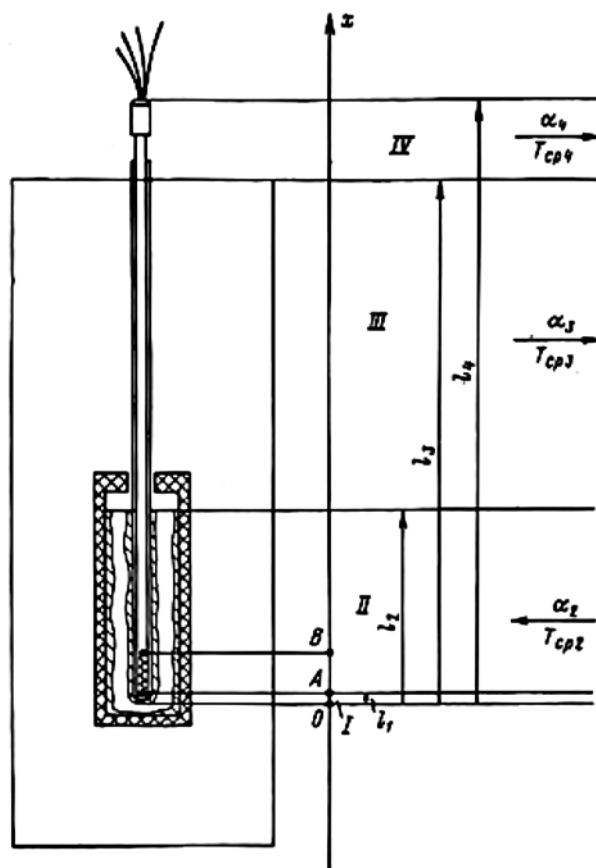


Рис. 2. Графическое изображение участков системы, включенных в математическую модель работы [5]

В установках, применяемых для градуировки эталонных ТС с кварцевым корпусом по реперным точкам МТШ-90, обеспечивается погружение ТС в термометровый канал на глубину не менее 180 мм ниже уровня реперного металла в ампуле. При этом выступающая из ампулы часть

ТС длиной более 350 мм находится в нагретой печи с температурой, близкой к температуре фазового перехода чистого металла. Проведенные на основе одномерной модели расчеты погрешности, возникающей в результате отвода тепла в таких условиях, показали, что величиной этого вида погрешности можно пренебречь [5].

Такой же вывод можно сделать относительно эталонных ТС 2-го разряда с металлическим корпусом, первичная градуировка которых выполняется с помощью установок для воспроизведения реперных точек МТШ-90.

Однако применение эталонных ТС 2-го разряда с металлическим корпусом в условиях, отличных от условий их градуировки при первичной поверке, т. е. при недостаточном погружении корпуса, приводит к появлению неучтенной составляющей неопределенности измерений температуры.

В работе [2] приводятся формулы и диаграммы для практического нахождения минимальной глубины погружения, при которой обеспечивается уменьшение теплоотвода по корпусу эталонного ТС до определенного уровня. Тепловой поток вдоль стержня термометра от измеряемой среды наружу является причиной того, что термометр показывает несколько более низкую температуру, чем температура среды. Используя простую модель этого явления, авторы [2] получили соотношение между погрешностью показаний термометра ΔT_m и длиной погружения L :

$$\Delta T_m = (T_{amb} - T_{sys}) K \exp(-L / D_{eff}), \quad (1)$$

где T_{sys} и T_{amb} – температуры системы и окружающей среды соответственно; D_{eff} – эффективный диаметр термометра; K – постоянная порядка единицы.

Это уравнение, графически изображенное на рис. 3 для случая $K = 1$, используется в [2] для определения минимальной глубины погружения, обеспечивающей допустимую величину погрешности вследствие теплоотвода вдоль стержня термометра.

Из уравнения (1) предлагаются следующие практические правила:

- 1) для технических термометров глубина погружения, равная 5 диаметрам, обеспечивает точность 1 %;
- 2) для хороших лабораторных термометров рекомендуется глубина погружения, равная 10 диаметрам, для достижения точности 0,01 %;

- 3) для достижения точности 0,0001 % рекомендуется глубина погружения, равная 15 диаметрам.

Для термометра, содержащего чувствительный элемент длиной 20 мм и более, его длина должна добавляться к рекомендованной глубине погружения. И, кроме того, весь чувствительный элемент должен находиться в области равномерной температуры.

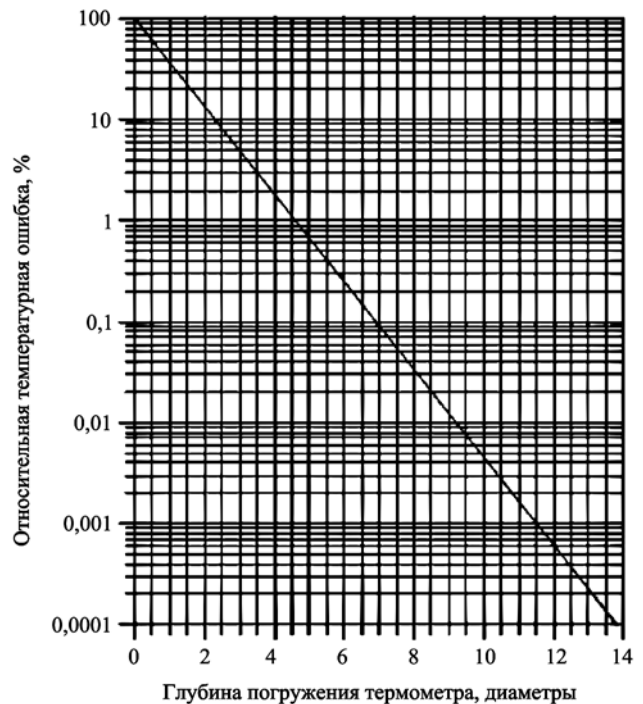


Рис. 3. Зависимость относительной температурной погрешности от глубины погружения ТС (в диаметрах корпуса)

В предложенной формуле (1) имеется эффективный диаметр, но не раскрывается, что он включает в себя. Более того, в работе [2] не приводятся вывод этой формулы и условия, для которых построена модель. Поэтому невозможно оценить, каким образом учитываются конкретная конструкция ТС и условия теплообмена с измеряемой средой, имеющие место в системе «ЧЭ – металлический корпус – твердотельный термостат» или «термостат иного типа – окружающая воздушная среда», а также длина выступающей части металлического корпуса ТС.

Отсутствие информации об экспериментальных исследованиях влияния длины выступающей части эталонного ТС с металлическим корпусом на неопределенность измерений температуры при калибровке ТС стало причиной разработки нового экспериментального метода оценки иммерсионной составляющей неопределенности изме-

рений температуры при градуировке и поверке ТС с металлическим корпусом различной длины. Основное внимание было уделено исследованию влияния длины выступающей части металлического корпуса эталонного ТС при постоянной глубине погружения, что имеет место при использовании широко распространенных калибраторов температуры (КТ) с глубиной твердотельного термостата 160 и 200 мм. При этом длина измерительной вставки термометра (чувствительный элемент с выводами в четырехканальных керамических изоляторах) оставалась постоянной.

Известные рекомендации по экспериментальной проверке достаточности глубины погружения эталонного ТС в ампулу реперной точки являются неприменимыми, так как обеспечить увеличение глубины погружения на 1...2 диаметра в калибраторах температуры невозможно.

Не во всех случаях можно обеспечить необходимую глубину погружения, при которой чувствительный элемент (ЧЭ) принял бы температуру, близкую к температуре измеряемой среды, из-за конструктивных особенностей термометров и термостатирующих устройств. Минимальная иммерсионная ошибка при измерениях температуры имеет место в процессе градуировки эталонных термометров стержневого типа с длиной кварцевого корпуса более 500 мм по первичным реперным точкам МТШ-90.

Учитывая актуальность этой проблемы, в лаборатории термометрии ФГУП «ВНИИМС» были проведены экспериментальные исследования, направленные на ее решение применительно к эталонным и прецизионным ТС с металлическим корпусом. В основу экспериментальных исследований был положен принцип физического моделирования, при котором измерялось сопротивление прецизионного ТС с корпусом из нержавеющей стали при постоянной температуре плавления металла и глубине погружения, но при разной длине выступающей части ТС. В процессе экспериментальных исследований многократно воспроизводились и регистрировались кривые плавления индия при одинаковой мощности теплового потока, подводимого от стенок термостата калибратора температуры к корпусу малогабаритной ампулы.

Для проведения исследований был выбран ТС с проволочным ЧЭ диаметром 2,5 мм, длиной 36 мм со сменным корпусом из нержавеющей стали «ИНКОНЕЛЬ 600» диаметром 4 мм, с толщиной

стенок 0,2 мм. В процессе исследований измеряли и регистрировали сопротивление ТС, погруженного в малогабаритную ампулу, в которой воспроизводилась постоянная температура плавления индия с помощью калибратора температуры 250SE. Глубина погружения ТС в ампулу была постоянной, равной глубине термометрового кармана (135 мм), а выступающая часть корпуса ТС менялась за счет замены металлического корпуса. Измерения проводились последовательно, при каждой длине металлического корпуса ТС из ряда 50, 150, 240, 300 и 390 мм. При этом регистрировались кривые плавления индия в контролируемых условиях теплообмена в системе «корпус термометра – ампула – твердотельный термостат – окружающая воздушная среда».



Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования иммерсионной составляющей погрешности измерений сопротивления чувствительного элемента термометра

Основное метрологическое оборудование, с помощью которого проводились экспериментальные исследования, состояло из: малогабаритной ампулы индия конструкции ВНИИМС, ампулы галлия из состава вторичного эталона температуры ВНИИМС, портативных калибраторов температуры типа 250-SE с цилиндрическим гнездом твердотельного термостата для 210 x 26 мм и прецизионного измерителя температуры МИТ-8.15 для измерений сопротивления исследуемого

двух ТС, а также температуры выступающей части ТС и температуры в помещении.

На рис. 4 изображена установка, применявшаяся для экспериментальных исследований иммерсионной составляющей неопределенности измерений температуры с использованием метода физического моделирования, состоящего в измерении выходного сигнала термометра при изменении длины металлического корпуса при постоянной длине погруженной части термометра.

Экспериментальные исследования по определению зависимости иммерсионной составляющей погрешности измерений сопротивления от длины выступающей части металлического корпуса выполнялись на ТС-100-203М с проволочным платиновым ЧЭ ($L_{\text{чз}} = 36$ мм, $d = 2,5$ мм), с корпусом из нержавеющей стали «ИНКОНЕЛЬ 600» ($d = 4$ мм с толщиной стенок 0,2 мм), снабженным разъемом типа «ЛЕМО». Измерения проводились в малогабаритной ампуле индия (In3min) с термометровым каналом глубиной 135 мм. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что при увеличении длины корпуса 240 мм на 60 мм значение сопротивления уменьшается на 0,0114 Ом или на 0,03 °С в температурном эквиваленте, а при увеличении на 150 мм – значение соответственно изменяется на 0,14 °С, что позволяет оценить иммерсионную составляющую измерений температуры. На рис. 5 изображена кривая, отображающая изменение сопротивления ТС в температурном эквиваленте при различных длинах металлического корпуса.

Стабильность исследуемого термометра ТС-100-203М периодически контролировалась в

аттестованной ампуле галлия (ампула Ga № 11) из состава вторичного эталона температуры ВНИИМС. В табл. 2 приведены результаты периодического контроля стабильности за промежутки времени, включающий в себя проведение экспериментальных исследований. Изменение сопротивления ТС оценивалось относительно значения сопротивления, измеренного при минимальной длине корпуса, равной 50 мм, т. е. в условиях отсутствия выступающей части корпуса.

Таблица 2

Последовательность контроля стабильности ТС-100-203М	R_t , Ом	ΔR_t , Ом (°С)	Δt , мК
В начале эксперимента	111,5580	–	–
В процессе эксперимента	111,5578	0,0002	0,5
После окончания	111,5577	0,0003	0,8

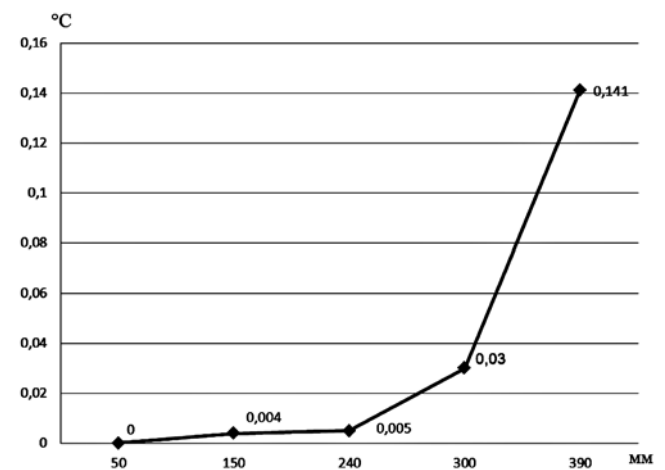


Рис. 5. Изменение сопротивления ТС в температурном эквиваленте при различных длинах металлического корпуса

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований зависимости иммерсионной составляющей погрешности термометра ТС-100-203М от длины выступающей части металлического корпуса

Длина корпуса термометра, мм	Сопротивление при трех реализациях кривых плавления индия, выполненных для ТС с разной длиной корпуса и одинаковой погружаемой частью, R_{in} , Ом			Среднее значение сопротивления, R_{in} , Ом	ΔR_t , Ом (°С)	Длина выступающей части металлического корпуса ТС из термометрового канала ампулы индия и КТ, мм
	1	2	3			
50	159,7889	159,7889	159,7890	159,7899	0	0
150	159,7886	159,7884	159,7885	159,7885	0,0014 (0,004)	0
240	159,7879	159,7881	159,7877	159,7879	0,002 (0,005)	65
300	159,7781	159,7788	159,7786	159,7785	0,0114 (0,03)	125
390	159,7462	159,7463	159,7463	159,7463	0,0436 (0,141)	215

Проведенный контроль стабильности ТС-100-203М за период проведения экспериментальных исследований подтверждает надежность результатов измерений, выполненных в режиме многократного воспроизведения кривых плавления индия в малогабаритной ампуле In min № 3.

Заключение

1. Разработан новый метод экспериментального определения иммерсионной составляющей неопределенности измерений температуры эталонными ТС с металлическим корпусом произвольной длины, предназначенный для исследования новых типов эталонных термометров сопротивления. Метод заключается в изменении длины выступающей части металлического корпуса термометра при неизменной глубине его погружения и длине измерительной вставки термометра (чувствительный элемент с выводами в четырехканальных керамических изоляторах).

2. Показано, что иммерсионная составляющая погрешности измерений температуры возрастает с увеличением длины выступающей части металлического корпуса термометра и выходит за пределы допустимых значений доверительных погрешностей, установленных для термометров сопротивления эталонных 2-го и 3-го разрядов.

3. При оценке результатов периодической поверки методом сличения эталонных ТС с металлическим корпусом, первичная поверка которых была выполнена по реперным точкам МТШ-90, необходимо учитывать иммерсионную составляющую неопределенности измерений выходного сигнала термометра, которая зависит от разницы длины выступающей части металлического корпуса поверяемого термометра при первичной и периодической поверках.

4. Для исключения ошибок 1-го рода при поверке эталонных и прецизионных термометров с металлическим корпусом в портативных калибраторах температуры необходимо провести унификацию их размеров и изготавливать ТС с длиной металлического корпуса от 180 до 300 мм и единым диаметром 4 мм.

5. В методиках поверки и калибровки эталонных ТС с металлическим корпусом необходимо указывать глубину погружения, при которой они градуировались, а также минимальную глубину погружения в процессе их поверки в портативных калибраторах температуры.

Список литературы:

1. Кноблаух О., Генки К. Точное измерение температур в технике. – Л.: ДВОУ, 1931.
2. Nicholas J.W., White D.R. Traceable temperatures. An introduction to temperature measurement and calibration. – John Wiley & Sons, LTD, 2001.
3. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971.
4. Гордов А.Н., Малков Я.В., Эргардт Н.Н., Ярьшев Н.А. Точность контактных методов измерения температуры. – М.: Издательство стандартов, 1976.
5. Фаянс А.Х., Раскин А.А. Труды метрологических институтов СССР. Вып. 207 (267). – Л.: ВНИИМ, 1977.
6. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978.

Евгений Васильевич Васильев,
канд. техн. наук, ведущ. научный сотрудник,
Александр Александрович Игнатов,
начальник лаборатории,
Михаил Иванович Калинин,
канд. физ.-мат. наук, ведущ. научный сотрудник,
Леонид Дмитриевич Маркин,
инженер,
ФГУП «ВНИИМС»,
г. Москва,
e-mail: vasiliev@vniims.ru