

Н.П. Моисеева, С.В. Григорьев

НОВЫЙ ЭТАЛОННЫЙ ЦИФРОВОЙ ТЕРМОМЕТР LTA. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация

В ООО «ТЕРМЭКС» разработан новый малогабаритный электронный термометр LTA, который может применяться как эталонный прибор для поверки рабочих СИ температуры, а также как точный лабораторный термометр, который может заменить большинство ртутно-стеклянных термометров, используемых в нефтегазовой отрасли. В данной статье основное внимание уделено исследованию метрологических характеристик LTA, в частности нестабильности его характеристик за интервал времени между поверками. По результатам испытаний, которые проведены в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», термометр удовлетворяет требованиям к эталонам 3-го разряда по точности и стабильности.

Ключевые слова: эталонный термометр, электронный термометр, цифровой термометр, поверка СИ температуры, нестабильность характеристик термометра.

В связи с введением постановления Правительства РФ № 734 от 23.04.2010 г. об обязательной аттестации эталонов, используемых в сфере государственного контроля и регулирования, в настоящее время наблюдается значительное расширение парка приборов, которые получают статус эталона. Все термометры сопротивления, термопары, ртутные термометры, цифровые термометры и калибраторы температуры, которые применяются для калибровки СИ температуры, а также для измерений температуры в аналитических и поверочных лабораториях при передаче других физических единиц, сейчас должны оформляться как эталоны и вноситься в реестр эталонов. В результате к концу 2018 года в реестре зарегистрировано уже более 5000 утвержденных эталонов температуры.

Назвать термометр «эталонным» несложно, однако не секрет, что далеко не все типы термометров отвечают потребностям поверочных и аналитических лабораторий. Выбор эталонного термометра не такая простая задача. Если лаборатория выбирает ПТС-10, ЭТС-100 или ПТСВ, то в дополнение к нему нужен точный измерительный прибор. Таким образом, комплект аппаратуры будет дорогим и не очень удобным, поскольку измерительный прибор требует и специального места и, как правило, компьютера для считывания и регистрации показаний.

Поэтому все большей популярностью пользуются малогабаритные электронные термометры, которые имеют датчик и небольшой измерительный блок, показывающий температуру в градусах. Такой легкий переносной прибор может использоваться и для поверок рабочих СИ в терmostатах в условиях поверочной лаборатории, и для контроля температуры при определении параметров нефтепродуктов, а также при выездных поверках. Очень важное назначение – замена ртутно-стеклянных термометров, большое количество которых все еще используется в нефтегазовой отрасли.

Ключевым вопросом при разработке и испытаниях цифрового эталонного термометра является исследование его точности и стабильности. Как правило, производители таких приборов указывают в качестве характеристики его точности только предел погрешности измерений, который определяется при первичной поверке прибора, не уделяя при этом внимания возможному изменению градуировочной характеристики во время интенсивного использования прибора. А ведь именно стабильность в интервале между поверками – это то, что нужно знать потребителю.

В данной статье речь пойдет о новой разработке ООО «ТЕРМЭКС» – малогабаритном лабораторном термометре LTA – и основное вни-

мание будет уделено исследованию его погрешности и стабильности за два года эксплуатации.

В термометре LTA сочетаются две требуемые для современного СИ группы свойств: 1) потребительские свойства, делающие прибор удобным в использовании; 2) свойства, обеспечивающие необходимую для многих метрологических задач точность.

Остановимся сначала на потребительских свойствах:

- 1) у термометра LTA компактные размеры и небольшой вес;
- 2) датчик термометра представляет собой тонкий металлический щуп. У некоторых исполнений прибора длина датчика может варьироваться в зависимости от потребностей заказчика;
- 3) оригинальный дизайн прибора позволяет с удобством размещать его как на горизонтальных поверхностях полок и столов, так и надежно фиксировать при помощи встроенных магнитов на вертикальных поверхностях – корпусах терmostатов;
- 4) прибору практически не требуется времени для разогрева, чтобы обеспечить заявленные метрологические характеристики. Через несколько секунд после включения он полностью готов к работе;
- 5) термометр имеет целый ряд встроенных функций, таких как запись во внутреннюю память, определение минимального, максимального и среднего значений за интервал измерения;
- 6) в комплекте имеются интерфейс USB и программное обеспечение для настройки, управления и считывания показаний прибора.

На рис. 1 показана фотография термометра LTA в комплекте с платиновым термометром сопротивления.

Необходимо отметить, что термометр LTA был создан в результате работы ООО «ТЕРМЭКС» над развитием и совершенствованием популярной модели ЛТ-300.

В настоящее время лабораторные термометры ЛТ-300 очень часто вносятся в реестр эталонов как эталонные термометры 3-го разряда. Эти приборы изначально разрабатывались как термометры для нужд испытательных лабораторий, и производитель ООО «ТЕРМЭКС» не планировал использовать их в качестве эталонов при выполнении метрологических работ. Но, как это зачастую случается, жизнь скорректировала первоначальные планы, и, так как ЛТ-300 нашел массовое применение в метрологических службах, производитель был вынужден заняться разработкой следующего поколения этого популярного термометра. Здесь пригодился многолетний опыт изготовления и периодических поверок термометров ЛТ-300.

При создании LTA сначала было проведено тщательное исследование различных платиновых чувствительных элементов с целью определения для них технически достижимого предела погрешности измерений температуры. Для этого исследования была разработана длительная программа испытаний, имитирующая практическое использование термометров и включающая в себя следующие процедуры: отжиг при максимально допустимой температуре, использование по назначению, термоциклирование в диапазоне



Рис. 1. Цифровой эталонный термометр LTA в комплекте с платиновым термометром сопротивления

от минимальной до максимально допустимой температуры, складское хранение и транспортировка, в том числе самолетом. После окончания каждой процедуры испытаний определялись отклонения сопротивления термопреобразователей от их начального значения. Исследования продолжались в течение 5 лет, и полученные результаты были представлены в докладе на международной конференции «Температура-2015» [1]. В результате проведенных исследований был выбран чувствительный элемент, с использованием которого можно было бы создать электронный термометр с пределом погрешности не более $\pm 0,02$ °C. При разработке электронного блока нового термометра LTA были учтены опыт использования и «слабости» предшественника – термометра ЛТ-300.

Первая изготовленная партия новых приборов LTA была градуирована в жидкостных терmostатах сличением с эталонными термометрами 1-го разряда. Затем приборы подвергались термоциклированию при температурах от -50 до +200 °C. После серии циклов проводились измерения в реперной точке галлия (GA). В конце испытаний, длившихся более года, была проверена сохранность градуировок. Для всех термометров первой партии отклонения показаний от начального значения не превысили 0,02 °C.

В результате исследования точности и стабильности термометра LTA (для исполнения LTA-Э) были установлены следующие метрологические характеристики:

- предел основной погрешности составил $\pm 0,02$ °C в диапазоне измеряемых температур от -50 до +200 °C;
- это же значение $\pm 0,02$ °C было заявлено производителем как допустимая нестабильность показаний термометра за длительный промежуток времени – интервал между поверками, что соответствует эталону 3-го разряда.

Здесь необходимо отметить, что несмотря на то, что производитель в своей документации приводит предел основной погрешности прибора, для его использования в качестве эталона 3-го разряда следует при поверке оценить доверительные границы погрешности, при калибровке оценить расширенную неопределенность калибровки прибора в конкретных условиях.

Для того чтобы оценить расширенную неопределенность калибровки и проверить нестабильность LTA, был выбран самый надежный способ проверки – использование термометра в реальных условиях поверочного центра в течение двух лет. Контрольные испытания точности и стабильности опытного экземпляра термометра LTA-Э были произведены на базе лаборатории термометрии ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Для испытаний в лабораторию ВНИИМ был представлен один экземпляр цифрового термометра LTA-Э с двумя датчиками температуры (условные номера: ТС 05 и ТС 06). Цифровой термометр был настроен так, чтобы было возможно производить измерения сопротивления подключенных термометров и сохранять результаты.

Таблица 1

Результаты калибровки термометров ТС 05 и ТС 06 в реперных точках МТШ-90

Реперная точка	ТС 05			ТС 06		
	R, Ом	СКО, Ом	W	R, Ом	СКО, Ом	W
TPW	99,94522	0,000123	–	99,93359	0,000061	–
SN	187,30016	0,000224	1,874054	187,30844	0,000145	1,874330
TPW	99,94383	0,000285	–	99,93353	0,000090	–
IN	159,66219	0,000142	1,597549	159,66416	0,000264	1,597724
TPW	99,94198	0,000096	–	99,93226	0,000103	–
SN	187,29782	0,000150	1,874041	187,30578	0,000185	1,874303
TPW	99,94329	0,000119	–	99,93356	0,000105	–
IN	159,66320	0,000239	1,597551	159,66301	0,000287	1,597698
TPW	99,94249	0,000130	–	99,93314	0,000112	–
SN	187,29908	0,000347	1,874063	187,30602	0,000240	1,874322
TPW	99,94277	0,000127	–	99,93269	0,000154	–
IN	159,66369	0,000254	1,597526	159,66480	0,000262	1,597701
TPW	99,94434	0,000093	–	99,93408	0,000109	–

ты в памяти прибора. Все данные, приведенные в табл. 1-4, получены с использованием цифрового термометра LTA, никакие другие приборы для измерения сопротивления не использовались. На первом этапе проводилась калибровка датчиков в реперных точках МТШ-90: тройной точке воды (TPW), точке затвердевания индия (IN) и точке затвердевания олова (SN). Цель калибровки – проверить стабильность показаний в реперных точках МТШ-90 и оценить расширенную неопределенность калибровки эталонных термометров. В табл. 1 приведены результаты калибровки, включающей в себя три цикла измерений в реперных точках: W – относительное сопротивление термометра; $W = R_{\text{пр}} / R_{\text{tpw}}$, где $R_{\text{пр}}$ – в реперной точке (SN, IN); R_{tpw} – сопротивление термометра в тройной точке воды (TPW).

В табл. 2 и 3 приведен расчет расширенной неопределенности калибровки LTA в комплекте с двумя датчиками: ТС 05 и ТС 06. В расчете учтены следующие влияющие факторы: случайные эффекты при измерении сопротивления (стандартная неопределенность оценивается, как на СКО показаний за более чем 100 отсчетов) – колонки 3 и 4 (в эквиваленте температуры); нестабильность термометров за три цикла измерений в реперных точках (СКО по трем фазовым переходам) – колонка 5; стандартная неопределенность реализации реперных точек (данные ВНИИМ) – колонка 6. Расширенная неопределенность калибровки – колонка 7 – рассчитана при коэффициенте расширения $K = 2$. В колонке 2 таблиц приводятся средние арифметические значения

относительных сопротивлений термометров в реперных точках $W_{\text{сред}}$.

Расчеты показывают, что расширенная неопределенность калибровки термометров LTA-Э не превышает $0,003^{\circ}\text{C}$ при 0°C и $0,005^{\circ}\text{C}$ при 230°C . Таким образом, согласно требованиям к эталонному термометру по ГОСТ 8.461–2009 [2] (расширенная неопределенность калибровки эталона должна быть не более $1/3$ от допуска поверяемых СИ), данный эталон может быть использован для поверки рабочих термометров сопротивления класса АА, допуск которых составляет $0,1^{\circ}\text{C}$ при 0°C и $0,44^{\circ}\text{C}$ при 200°C . Если рассматривать данный прибор LTA с точки зрения требований государственной поверочной схемы для средств измерения температуры [3], которая устанавливает для эталонных термометров требования к границам доверительной погрешности измерений, то расчеты показывают, что доверительная погрешность очень близка по значению к расширенной неопределенности при $K = 2$. Требования [3] к соотношению границ доверительной погрешности рабочего эталона 3-го разряда и предела допускаемой погрешности рабочего средства измерений не более $0,5$ (1:2) также выполняются.

Термометр ТС 05 после градуировки использовался в лаборатории ВНИИМ в течение 6 мес. Термометр применяли для поверки рабочих СИ температуры, калибраторов, термостатов и другого оборудования примерно 2...3 ч в день в диапазоне температур от 0 до 200°C . Через 6 мес. эксплуатации были проведены измерения в ре-

Таблица 2

Расчет неопределенности калибровки ТС 05

Реперная точка	$W_{\text{сред.}}$	Эл. измер. СКО, Ом	Эл. изм. СКО, К	Нестаб. СКО, К	Расш. неопр. реп. т., К	Расш. неопр. калибр., К
1	2	3	4	5	6	7
TPW	99,94341	0,00014	0,00035	0,00107	0,00015	0,0023
IN	1,59754	0,00021	0,00056	0,00117	0,00070	0,0027
SN	1,87405	0,00024	0,00065	0,00183	0,00200	0,0044

Таблица 3

Расчет неопределенности калибровки ТС 06

Реперная точка	$W_{\text{сред.}}$	Эл. измер. СКО, Ом	Эл. изм. СКО, К	Нестаб. СКО, К	Расш. неопр. реп. т., К	Расш. неопр. калибр., К
1	2	3	4	5	6	7
TTB	99,93326	0,00010	0,00026	0,00058	0,00015	0,0013
IN	1,59771	0,00027	0,00071	0,00141	0,00070	0,0032
SN	1,87432	0,00019	0,00051	0,00229	0,00200	0,0051

перных точках TPW, IN, SN. На представленном графике (рис. 2) можно видеть, что изменение показаний термометра в реперных точках не превысило предел $\pm 0,01$ °C. К сожалению, данный термометр вышел из строя из-за неосторожного обращения (перегрева до 400 °C), поэтому эксперименты с ним больше не проводились.

Термометр ТС 06 после градуировки, проведенной в конце сентября 2016 г., интенсивно использовался в лаборатории ВНИИМ в течение 1 мес. При этом не отмечалось изменения показаний в точках TPW и IN более чем на $\pm 0,005$ °C. Затем он практически не работал в течение 9 мес. После перерыва было замечено снижение температур, регистрируемых в реперных точках (см. результат 02.08.2017 г.): в точке TPW – до 0,005 °C и в точке IN – до 0,012 °C. В дальнейшем, с августа 2017 г. по ноябрь 2018 г., термометр использовался в лаборатории практически ежедневно, при этом подвергался циклическому

нагреву в термостатах, также применялся в ходе выездных поездок на предприятия. Периодически проводились калибровки термометра в тройной точке воды, точке плавления галлия, точках затвердевания индия и олова. В табл. 4 приведены результаты измерения сопротивления датчика ТС 06 за все время эксплуатации. Изменения показаний в эквиваленте температуры представлены в виде графика на рис. 3.

Результаты показывают, что даже при интенсивной эксплуатации LTA-Э в комплекте с датчиком ТС 06 его нестабильность находится в пределах $\pm 0,02$ °C. В процессе исследований нестабильности было отмечено интересное свойство этого термометра. При длительном хранении или при длительной эксплуатации в диапазоне до 150 °C термометр может снизить свое сопротивление на 0,01...0,02 °C в эквиваленте температуры. Однако значение сопротивления может быть восстановлено при нагреве термометра в течение

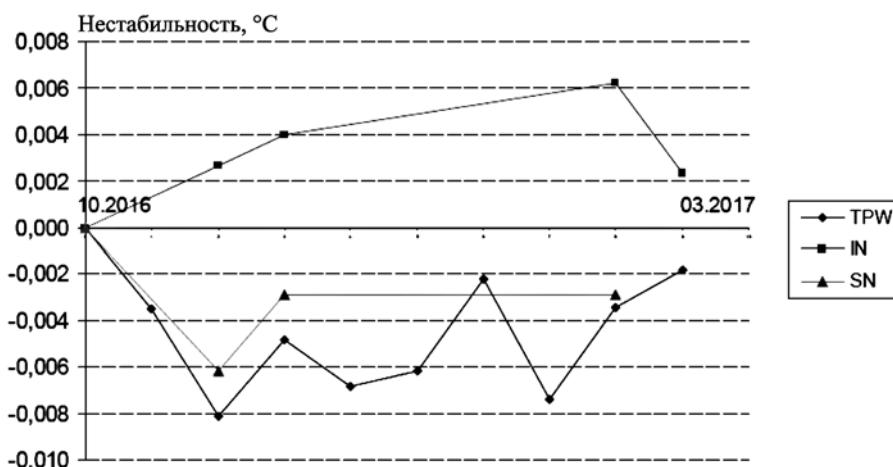


Рис. 2. Нестабильность сопротивления ТС 05 в реперных точках TPW, IN, SN за 6 мес. эксплуатации в интенсивном режиме

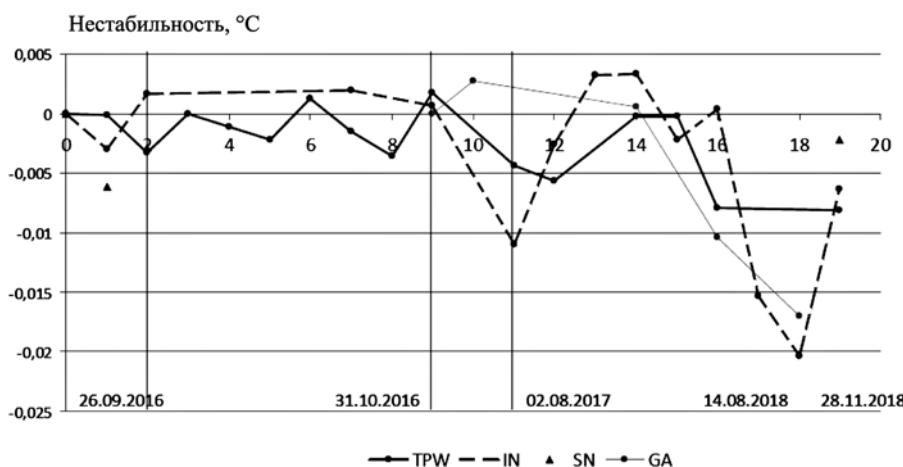


Рис. 3. Изменение показаний термометра LTA в комплекте с датчиком ТС 06 за период эксплуатации с 09.2016 г. по 11.2018 г.

1...2 ч при 230 °С. Это свойство в дальнейшем имеет смысл включить в инструкцию по эксплуатации для того, чтобы пользователь мог использовать LTA-Э с наилучшей возможной точностью.

В данной статье мы исследовали точность и стабильность нового цифрового эталонного термометра LTA, разработанного ООО «ТЕРМЭКС». В настоящее время существует много цифровых термометров, выпускаемых российскими и зарубежными производителями. Однако данные по стабильности их характеристик при длительной эксплуатации практически не публикуются. Поэтому настоящая статья будет интересна метрологам и всем, кто заинтересован в точном измерении температуры с помощью удобного малогабаритного эталонного термометра. Особо следует отметить, что LTA позволяют заменить большинство ртутных термометров, которые должны быть в ближайшие годы изъяты из обращения согласно подписанный в 2014 году международной конвенции, предусматривающей поэтапный отказ от использования ртути.

Список литературы:

- Григорьев С.В., Закиров Р.М. Исследование долговременной стабильности компактных термопреобразователей сопротивления на основе платиновых чувствительных элементов компании HERAEUS / Доклад на конференции «ТЕМПЕРАТУРА-2015», 21-24 апреля 2015 г., г. Санкт-Петербург.
- ГОСТ 8.461–2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки.
- ГОСТ 8.558–2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры.

Наталья Павловна Моисеева,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,

г. С.-Петербург,
Сергей Валерьевич Григорьев,
канд. техн. наук, директор по развитию,
ООО «ТЕРМЭКС»,
г. Томск,

e-mail: n.p.moiseeva@vniim.ru

Таблица 4

Исследование нестабильности термометра LTA в комплекте с датчиком ТС 06

	SN	IN	TPW	GA
26.09.2016	187,30844	159,66416	99,933587	–
24.10.2016	187,30690	159,66491	99,932981	111,52717
25.10.2016	–	159,66443	–	–
31.10.2016	–	–	99,934291	111,52822
–	–	–	–	–
01.11.2016	–	159,65999	–	–
02.08.2017	–	–	99,931846	–
–	–	159,66317	–	–
14.08.2017	–	–	99,931339	–
22.08.2017	–	159,66538	–	–
23.08.2017	–	–	–	111,52739
28.09.2017	–	–	99,933512	–
31.10.2017	–	159,66542	99,933504	–
–	–	–	–	–
20.12.2017	–	159,66431	–	–
–	–	–	–	111,52322
23.01.2018	–	–	99,930406	–
29.01.2018	–	159,65834	–	–
29.01.2018	–	–	–	111,52071
24.04.2018	–	159,65644	–	–
14.08.2018	187,29934	–	–	–
14.08.2018	–	159,66176	–	–
26.11.2018	187,2993435	–	–	–
27.11.2018	–	159,6617554	–	–