

Метрологическое обеспечение измерений относительной влажности воздуха в условиях серийного производства термогигрометров



Для обеспечения серийного производства гигрометров научно-техническое предприятие «ТКА» разработало высокопроизводительные эталоны – генераторы влажного газа серий «ТКА-ГВЛ» и «ТКА-КВЛ». В статье описаны их конструктивные особенности, функциональные возможности, приведены характеристики. Рассмотрены также вопросы повышения инструментального качества проектируемых прецизионных гигрометров, имеющих погрешность измерения не выше 1% относительной влажности.

ООО «НТП «ТКА», г. Санкт-Петербург

На территории РФ в обращении находятся миллионы средств измерений, среди которых приборы для измерения физических факторов, включая температуру и влажность, составляют значительную долю.

Наше предприятие производит в год порядка пяти тысяч приборов в 30 модификациях, которые предназначены для измерений световой обстановки и параметров микроклимата в производственных и рабочих помещениях. Приборы, содержащие каналы измерений относительной влажности и температуры, составляют 25% от общего выпуска. Примерно столько же приборов поступает на проведение очередных проверок, калибровок и сервисное обслуживание. Итого за год через наш калибровочный центр проходит ориентировочно 2,5 тыс. термогигрометров, которые имеют абсолютные погрешности измерений (не более): по относительной влажности – $\pm 3,0\%$, по температуре – $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

По мере увеличения темпов выпуска термогигрометров мы столкнулись с необходимостью разработки собственных высокопроизводительных эталонов, в результате чего в нулевых годах был создан и сертифицирован в качестве эталона генератор влажного газа «ТКА-ГВЛ», работающий на принципе смешения двух потоков газа (воздуха), сухого и влажного, с ручным заданием уровня влажности двумя ротаметрами (рис. 1).

Этот генератор имеет погрешность измерений 1%, время рабочего цикла при диапазоне влажности (1–99)% и с интервалами задания рабочих точек в (5–10)% составляет около 4 часов (табл. 1).

В дальнейшем был разработан и сертифицирован полностью автоматизированный генератор с электронным управлением уровня влажности (с помощью двух кнопок: «больше», «меньше»), с шагом задания 1% относительной влажности.

Генератор выпускается в двух модификациях: «ТКА-ГВЛ-01-1» – рабочий эталон 1-го разряда с абсолютной погрешностью $\pm 1,0\%$, диапазон воспроизведения влажности от 1 до 100%; «ТКА-ГВЛ-01-2» – рабочий эталон 2-го разряда, с абсолютной погрешностью $\pm 2,0\%$ (рис. 2). Рабочий цикл генераторов составляет около двух часов, что позволяет за рабочую смену исследовать порядка 15–18 термогигрометров. В комплектность генератора 1-го разряда входит



Рис. 1. Генератор влажного газа «ТКА-ГВЛ»

Таблица 1. Основные характеристики линейки генераторов производства НТП «ТКА»

Параметр	Модели					
	ТКА-ГВЛ (генератор)	ТКА-ГВЛ-01-1 (генератор)	ТКА-ГВЛ-01-2 (генератор)	ТКА-ГВЛ-03 (генератор)	ТКА-КВЛ-03 (камера)	ТКА-КВЛ-04-Р ТКА-КВЛ-04-Э (калибраторы)
Ранг СИ	РЭ 1-го разряда	РЭ 1-го разряда	РЭ 2-го разряда	РЭ 2-го разряда	Испытательное оборудование	
Номер в Госреестре СИ РФ	№ 21074-01	№ 54028-13		Утверждено ОТ	-	
Диапазон воспроизведения относительной влажности, %	5–95	1–100	1–100	5–95	5–95	5–95
Погрешность воспроизведения относительной влажности, %	±1,0	±1,0	±2,0	±1,5; ±2,0; ±2,5 (в зависимости от камеры и установленной влажности)	<ul style="list-style-type: none"> • При использовании внешнего термогигрометра в качестве контрольного (например Rotronic HP) погрешность определяется в соответствии с описанием типа на соответствующий термогигрометр (±1,0 % для Rotronic HP), • ±2,0 – при использовании встроенного в камеру контрольного термогигрометра «ТКА-КВЛТ» 	
Способ управления уровнем влажности	Ротаметрами	Электронный			От внешнего генератора	04-Р – ротаметрами, 04-Э – электронный
Дискретность задания уровня влажности, %	Более 1	1	1	1	От внешнего генератора	Более 1 для 04-Р, 1 – для 04-Э
Наличие в комплекте поставки образцового гигрометра-компаратора	-	+	- (по отдельному заказу)	+	- (по отдельному заказу)	- (по отдельному заказу)
Количество рабочих камер	5	6	6	7	1	1
Камера на 8,3 л	-	-	-	+	+	+
Контроль уровня воды в насытителе (min/max)	+/-	+/+	+/+	+/+	-/-	+/+
Контроль эффективности осушителя	-	-	-	+	-	-
Связь с ПК (монитор/управление)	+/-	+/+	+/+	+/+	+/-	+/- для 04-Р, +/+ для 04-Э
Производительность, приборов за рабочий день	10	18	18	18–22	До 22	До 22

образцовый термогигрометр, в настоящее время это Rotronic модификации NuproPalm. Генератор снабжен шестью рабочими портами, не требует подключения к внешним газовым магистралям, питание 220 В 50 Гц, имеет двухстороннюю связь с ПК. Воспроизведение требуемого уровня влаж-



Рис. 2. Генератор влажного газа «ТКА-ГВЛ-01-1»



Рис. 3. Калибровочный центр ООО НТП «ТКА»



Рис. 4. Камера влажности «ТКА-КВЛ» с 6 рабочими портами



Рис. 5. Камера влажности «ТКА-КВЛ-03», рабочий объем 8,3 л

ности обеспечивается с помощью программно управляемых встроенных компрессоров. Генератор содержит встроенный контрольный термогигрометр, обеспечивающий функционирование по заданной программе, а также дополнительный внешний термогигрометр, подключаемый к генератору и обеспечивающий контроль окружающих условий по температуре, влажности и атмосферному давлению.

Данный тип генераторов производится с 2013 года, калибровочный

центр НТП «ТКА» оснащен четырьмя такими эталонами (рис. 3). Эти генераторы имеют спрос у метрологических служб России.

В качестве опции к генератору можно подключать камеру «ТКА-КВЛ» (рис. 4). Камера имеет 6 рабочих портов, диаметры которых могут выбираться при заказе.

Для обеспечения исследований габаритных термогигрометров нами разработана камера влажности «ТКА-КВЛ-03» (рис. 5), которая имеет по-

лезный объем 8,3 л, содержит встроенный контрольный термогигрометр и подключается к генератору «ТКА-ГВЛ-01» с помощью гибкого шланга и быстросъемных адаптеров (рис. 6).

В настоящее время по результатам государственных испытаний завершается оформление сертификата новой модели генератора – «ТКА-ГВЛ-03», в которой совмещены функции генератора «ТКА-ГВЛ-01» и камеры «ТКА-КВЛ-03» (рис. 7). Активация рабочих камер (либо шести малых, либо одной



Рис. 6. Камера влажности «ТКА-КВЛ-03» подключена к генератору «ТКА-ГВЛ-01»



Рис. 7. Генератор влажного газа «ТКА-ГВЛ-03»



Рис. 8. Расположение измерительного зонда контрольного термогигрометра в рабочей камере № 7 генератора «ТКА-ГВЛ-03»

большой, либо всех камер одновременно) обеспечивается тумблером, расположенным на лицевой панели генератора, при этом соединительных шлангов и адаптеров уже не требуется. В генераторе предусмотрен контроль влажности осушителя (сорбента) с отображением ее величины на дисплее генератора. При превышении некоторого критического значения (например, 5% отн. влажности, этот уровень задается в настройках генератора) включается сигнальная лампа на лицевой панели, информирующая о необходимости замены сорбента. Генератор укомплектован образцовым прибором Rotronic модификации NygroPalm (рис. 8).

Для проведения выездных работ на месте расположения проверяемых приборов разработан портативный калибратор влажности «ТКА-КВЛ-04» (рис. 9). Калибратор содержит в своем составе генератор влажности, рабочую камеру на 8,3 л, встроенный в камеру контрольный термогигрометр и дисплей. Выпускается в двух модификациях: «ТКА-КВЛ-04-Р» (управление уровня влажности двумя ротаметрами повышенного ресурса) и «ТКА-КВЛ-04-Э» (электронное управление).

Характеристики разработанного оборудования приведены в табл. 1.

Наличие на предприятии рабочих эталонов требует их соответствующей метрологической поддержки, по цепочке от Государственного первичного эталона либо вторичного этало-

на влажности [1, 2], включая методы и средства дистанционной метрологии [3]. Сегодня для этого используется в том числе ряд гигрометров-компараторов, к которым, на наш взгляд, было бы целесообразно добавить новые отечественные образцы с повышенными метрологическими и эксплуатационными свойствами.

Уровень метрологических требований к подобным приборам можно оценить по характеристикам гигрометра-компаратора, входящего в состав Государственного первичного эталона влажности ГЭТ 151-2014: диапазон относительной влажности – от 5 до 98%, СКО – не более 0,05%, неисключенная систематическая погрешность (НСП) – не более 0,2% [2, 4].

Отметим, что нелинейность передаточной характеристики (ПХ) вносит определенный вклад в бюджет погрешностей гигрометра. Минимизация погрешности, обусловленной нелинейностью ПХ, решается с использованием методов цифровой линейризации выходного сигнала гигрометра. Первичное сглаживание (линеаризация) ПХ чувствительного элемента емкостного датчика влажности реализуется, как правило, с помощью полиномов, что имеет, на наш взгляд, как положительные, так и отрицательные стороны.

Сегодня широко используются интеллектуальные цифровые датчики влажности и температуры, в которых первоначальное сглаживание ПХ чувствительных элементов уже обеспечено производителем, внесено

в алгоритм обработки сигнала, а выходной цифровой сигнал характеризуется коридором типовых погрешностей (включая нелинейность ПХ), приводимых в технической документации, например в [10].

Проведенные нами исследования различных типов интеллектуальных датчиков подтверждают, что у них имеется некоторая остаточная нелинейность ПХ в пределах от 1 до 3% отн. влажности. С этим обстоятельством приходится считаться, особенно при проектировании точных, максимально линейных термогигрометров, вводя соответствующие поправочные функции в алгоритм их работы.

Так, для интеллектуальных датчиков влажности и температуры типов EEN210, SHT85 исходные погрешности по влажности δRH могут достигать значений до $\pm 3\%$ RH, что видно из графиков, приведенных на рис. 10 и 11.

При составлении алгоритма введения корректирующих поправок мы полагаем, что исходная погрешность гигрометра δRH имеет нелинейный, знакопеременный характер и может быть аналитически аппроксимирована как результат суммирования трех функций вида [5]:

$$\delta RH_{TRUE} = a + b \cdot |(RH_{TRUE} - RH_0)|^\alpha, \quad (1)$$

где a , b , RH_0 – константы, индивидуальные для определенного типа датчика; α может принимать значения 1 или 2; RH_{TRUE} – значение влаж-

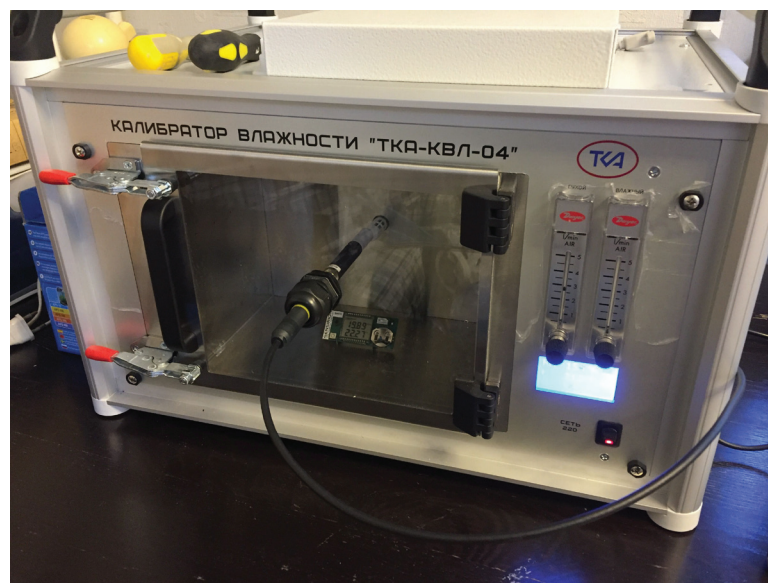


Рис. 9. Калибратор влажности «ТКА КВЛ-04»

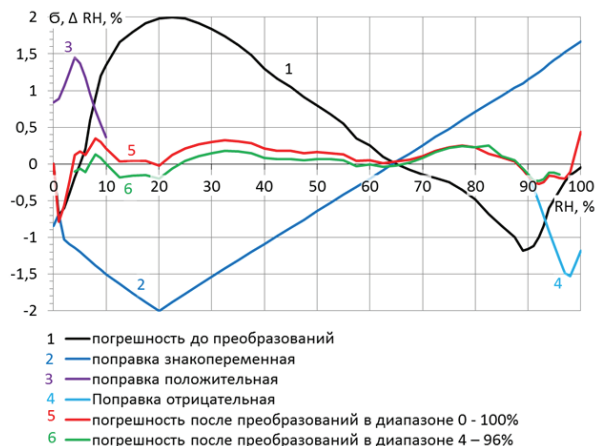
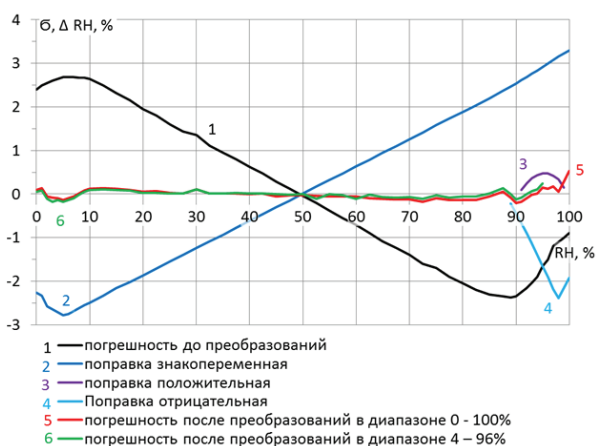


Рис. 10. Датчик EEN 210: результаты обработки выходного сигнала

Рис. 11. Датчик SHT85: результаты обработки выходного сигнала

ности, измеренное датчиком с учетом температуры.

Таким образом:

1. Введение первой поправки $\Delta RH_1 = -\delta RH_{TRUE}$, которая имеет знакопеременный характер, позволяет понизить нелинейность ПХ во всем диапазоне измерения:

$$RH_1 = RH_{TRUE} + \Delta RH_1. \quad (2)$$

2. Введение второй поправки $\Delta RH_2 = -\delta RH_1$, имеющей только положительные значения, позволяет компенсировать «провал» ПХ в определенной части диапазона измерения:

$$RH_2 = RH_1 + \Delta RH_2. \quad (3)$$

3. Введение третьей поправки $\Delta RH_3 = -\delta RH_2$, имеющей только отрицательные значения, позволяет компенсировать «горб» ПХ в определенной части диапазона измерения:

$$RH_3 = RH_2 + \Delta RH_3. \quad (4)$$

4. Для дальнейшего улучшения линейности ПХ мы вводим операцию

сглаживания (выпрямления) функции RH_3 по эталонным значениям влажности, используя метод минимизации среднего квадрата ошибки:

$$RH_{CORR} = [A + B \cdot RH_3] \pm \sqrt{(\sigma RH_{CORR})^2}, \quad (5)$$

где A, B – аддитивный и мультипликативный сдвиги функции RH_3 (смещение нуля и масштабирование ПХ); RH_{CORR} – результирующее значение влажности, отображаемое на дисплее прибора; $\sqrt{(\sigma RH_{CORR})^2}$ – итоговая величина среднего квадрата ошибки (СКО) определения прибором величины относительной влажности в сравнении с истинной (эталонной) влажностью.

Предложенный метод минимизации нелинейности ПХ гигрометров обеспечивает в рассмотренных случаях измерение относительной влажности с остаточной нелинейностью не выше $\pm 0,3\%$ RH относительно образцового средства. При таком подходе требуется индивидуальная градуировка гидро-

метра, вычисление и запись в память прибора параметров a, b, α, RH_0, A, B , оценка погрешности $\sqrt{(\sigma RH_3)^2}$, контрольная проверка настроенного прибора в генераторе влажности и дальнейшее исследование его долговременной стабильности.

На рис. 10 представлены результаты обработки выходного сигнала от датчика типа EEN 210, на рис. 11 – от датчика типа SHT85. В табл. 2 приведены результаты расчета констант поправочных функций для этих двух типов исследованных датчиков. Так, для первого датчика введение поправок позволило понизить ожидаемые значения СКО от 0,2 до 0,03%, а для второго датчика – от 0,8 до 0,13%, что подтверждает эффективность предложенного метода минимизации нелинейности ПХ.

Таблица 2. Результаты определения поправочных функций для двух типов датчиков влажности

Датчик	Параметры						
	Поправка $\Delta RH_1 (\pm)$ a_1 b_1 RH_{01} α_1	Поправка $\Delta RH_2 (+)$ a_2 b_2 RH_{02} α_2	Поправка $\Delta RH_3 (-)$ a_3 b_3 RH_{03} α_3	A смещение, % RH	В усиление (масштабирование)	До ввода поправок СКО = $\sqrt{(\sigma RH_{TRUE} / RH)^2}$ %	После ввода поправок СКО = $\sqrt{(\sigma RH_3)^2}$ %
EEN210	+0,25 -0,005 50 1	+0,35 -0,013 27,5 1	-0,62 +0,05 100 1	+0,02	0,99998	$\pm 0,20$	$\pm 0,03$
SHT85	-2,0 +0,0471 22 1	+1,5 -0,167 3 1	-1,6 +0,16 99 1	-0,24	1,0031	$\pm 0,77$	$\pm 0,13$



Рис. 12. Опытный образец прецизионного термогигрометра

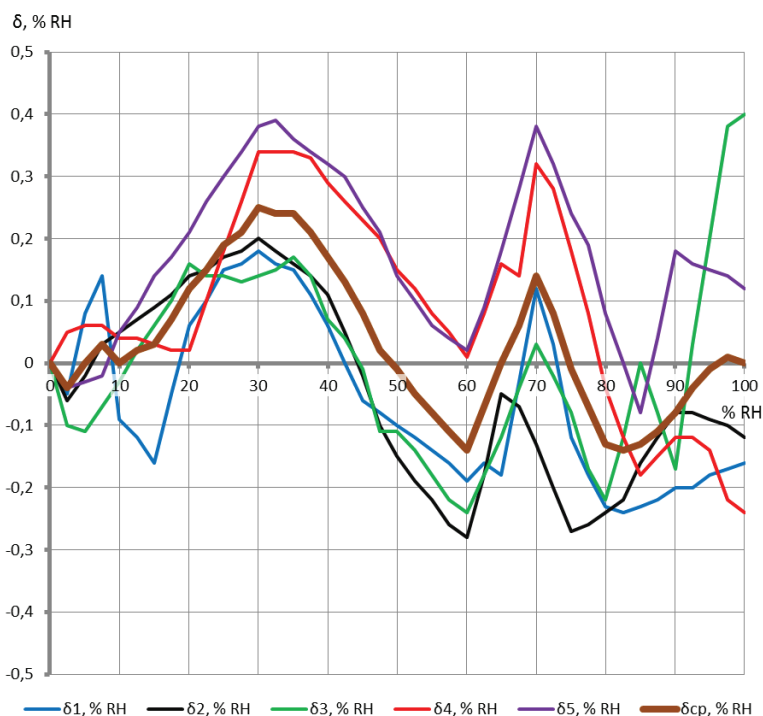


Рис. 13. Исследование метрологического качества измерения влажности опытным образцом термогигрометра: остаточные погрешности

С учетом вышеизложенного были изготовлены опытные образцы термогигрометра с применением рассмотренных интеллектуальных датчиков влажности и температуры (рис. 12). Основные характеристики: диапазон измерения относительной влажности – от 0 до 100 %; цена младшего разряда – 0,01 %; диапазон измерения температуры – от -50 до $+8$ °C с погрешностью $\pm 0,2$ °C, цена младшего разряда – 0,01 °C. Алгоритм обработки сигналов содержит вычисление поправок по формулам (1–5), а также вычисление/отображение температур точки росы и влажного термометра.

Для проверки фактического метрологического качества измерения приборами влажности было проведено их исследование на комплексе гигрометрической аппаратуры, включающей генератор влажного газа первого разряда «ТКА-ГВЛ-01-1», образцовые термогигрометры Rotronic HP 22-A, HP 23-A, термогигрометр Rotronic HP 32 (с зондами HC2A-S, HC2A-SH), зонд Rotronic Hygro Clip HC2A-S. На рис. 13 приведены результаты этого исследования, содержащего 5 циклов измерений (1 цикл/день). Видно, что в диапазоне влажности от 0 до 98 % остаточные (неисключенные) погрешности лежат в коридоре значений $-0,3\%$ / $+0,4\%$ отн. влажности. Полученный нами результат сопоставим

с метрологическим качеством рабочего эталона 1 разряда – генератора влажного газа 2000SP GEO [6], в котором используется зонд Rotronic Hygro Clip HC2A-S, а пределы допускаемой абсолютной погрешности воспроизводимой относительной влажности при температуре $23 \pm 0,3$ °C составляют $\pm 0,5\%$.

Полученные предварительные результаты по качеству измерений нашим прибором соответствуют требованиям поверочной схемы [1]. Основные технические решения в области создания гигрометров и генераторов влажности защищены авторским правом [5, 7, 8, 9].

Заключение

Современные тенденции метрологии направлены не только на повышение качества эталонного оборудования, но и на максимальное обеспечение условий и доступности проведения калибровок и поверок аттестованными метрологическими службами. Цифровая метрология должна быть легализована без снижения достоверности проведенных, в том числе дистанционных, испытаний.

Необходимым условием стабильности поддержания единства измерений в РФ является замещение импортной техники отечественной, не уступающей по своим характеристикам

лучшим зарубежным аналогам. Создание такой аппаратуры, по нашему мнению, возможно исключительно при тесном взаимодействии производителей оборудования и служб системы Госстандарта.

Литература

- ГОСТ 8.547-2009 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов.
 - Анашко А.А., Винге А.Ф., Винге М.А., Морозов С.А. Метрологические возможности Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/иней ГЭТ 151-2014 // Измерительная техника. 2017. № 2.
 - Сольский М.Б. Перспективы дистанционной поверки средств измерений влажности газов. Доклад ВНИИФТРИ на Всероссийском съезде метрологов и приборостроителей. Москва, 2019.
 - Наборы поверочные стационарные для средств измерений относительной влажности воздуха производства GEO Calibration Inc., США, ГРСИ РФ № 76316-19. Методика поверки УБЖК.413614.012 МП, 2019 г.
 - Y.A. Barbar, M.N, Golikov, K.A. Tomsky. Transfer characteristic linearization of relative humidity sensors. TEMPMEKO & ISHM 2010, Portoroz, Slovenia. Book of Abstracts Volume A, p. 101.
 - Генераторы влажного газа MODEL 2000SP производства GEO Calibration Inc., США, ГРСИ РФ № 76317-19. Методика поверки УБЖК.413614.010 МП, 2019 г.
 - Патент на полезную модель № 134297 «Генератор влажного газа». Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 10 ноября 2013 г.
 - Патент на изобретение № 2540885 «Генератор влажного газа и способ генерации газа с требуемой влажностью». Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 23 декабря 2014 г.
 - Патент на полезную модель № 183258 «Генератор влажного газа». Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 14 сентября 2018 г.
 - Digital humidity and temperature sensor EEEH210. Datasheet V1.0 April 2016. E+E ELECTRONIK GMBH.
- Ю. А. Барбар, к. т. н.,
технический директор,
К. А. Томский, д. т. н.,
генеральный директор,
Д. Е. Щур, зам. технического директора,
М. А. Рысков, главный конструктор,
ООО «НТП «ТКА», г. Санкт-Петербург,
тел.: +7 (812) 331-1981,
e-mail: info@tkaspb.ru,
сайт: www.tkaspb.ru