

Линейка приборов,  
обеспечивающих  
контроль основных  
параметров  
производственного  
микроклимата

"ТКА-ПКМ"



Производство измерительной техники

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "ТКА"**

ЛЮКСМЕТРЫ  
ЯРКОМЕТРЫ  
УФ-РАДИОМЕТРЫ



ТЕРМОГИГРОМЕТРЫ  
ТЕРМОАНЕМОМЕТРЫ  
МЕДТЕХНИКА

г. Санкт-Петербург, Грузовой проезд, д.33, корп.1, лит.Б  
Тел. 8(812)3311-98-1, 8(812)3311-98-2, 8(812)3311-98-8

<http://www.tkaspb.ru>  
[info@tkaspb.ru](mailto:info@tkaspb.ru)

# 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"> <li>• 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),</li> <li>• ±2,0 – при использовании встроенного в камеру контрольного термогигрометра «ТКА-КВЛТ»</li> </ul>	
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  $\delta RH$  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  $\delta RH$  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;  $\alpha$  может принимать значения 1 или 2;  $RH_{TRUE}$  – значение влаж-



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

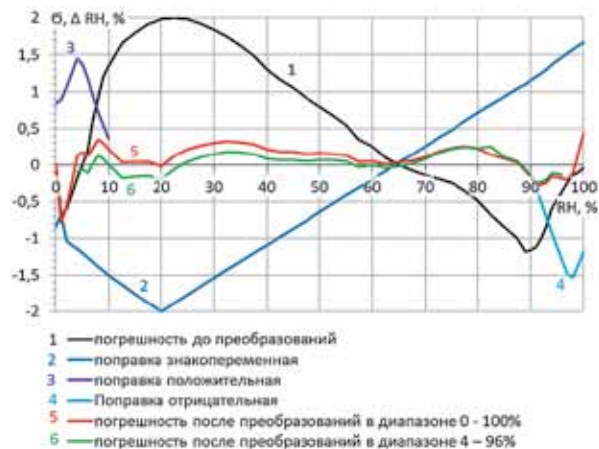
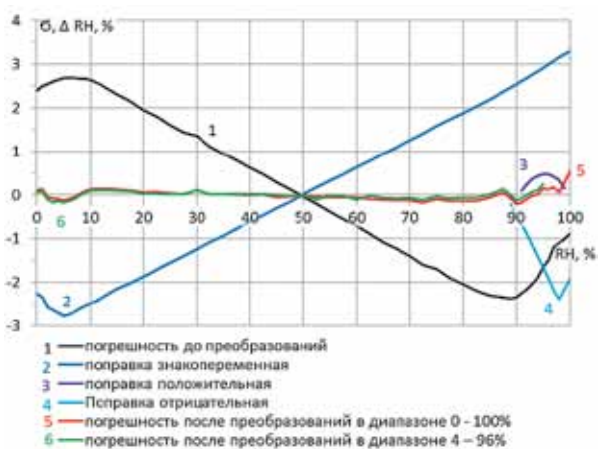


Рис. 10. Датчик EEN 210: результаты обработки выходного сигнала

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  $a, b, \alpha, RH_0, A, B$ , 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 $\Delta RH_1 (\pm)$ $a_1$ $b_1$ $RH_{01}$ $\alpha_1$	Поправка $\Delta RH_2 (+)$ $a_2$ $b_2$ $RH_{02}$ $\alpha_2$	Поправка $\Delta RH_3 (-)$ $a_3$ $b_3$ $RH_{03}$ $\alpha_3$	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

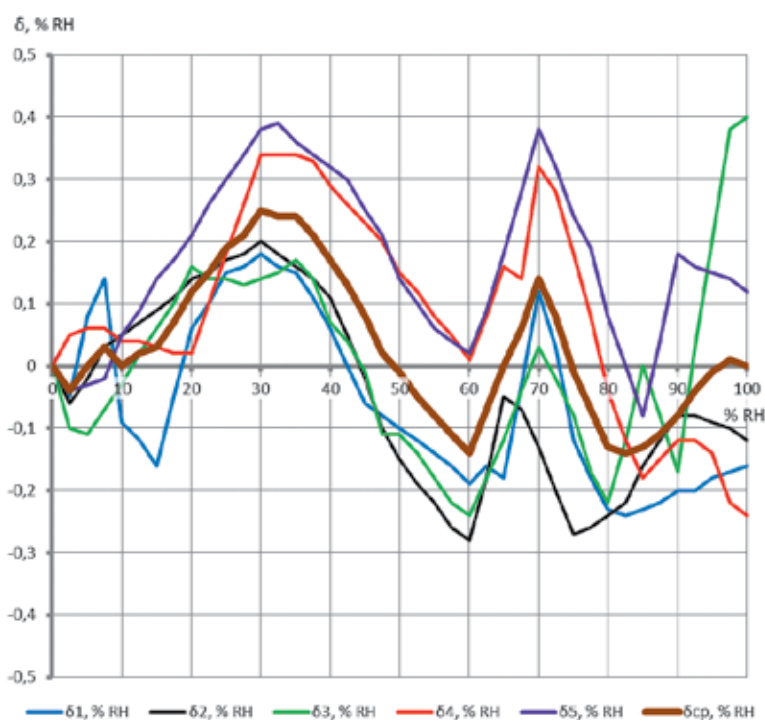


Рис. 13. Исследование метрологического качества измерения влажности опытным образцом термогигрометра: остаточные погрешности

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