

МЕТРОЛОГИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ С ДАТЧИКАМИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ.

Крюков А.В.

В статье проведен анализ погрешности измерения различных влажностных величин в широко распространенном случае, когда исходной измеряемой величиной является относительная влажность. Также приведены основные характеристики преобразователей температуры и влажности РОСА-10, выпускаемых НПП «Элемер».

Широкое распространение среди измерителей влажности газов получили приборы, имеющие в качестве первичных преобразователей сорбционно-емкостные датчики относительной влажности. Такие приборы оснащены также датчиками температуры, в результате чего не представляет труда с помощью встроенного микроконтроллера на основе измеренных значений относительной влажности и температуры получить значения других влажностных характеристик газа, таких как *температура точки росы* (далее – *точка росы*), *абсолютная влажность* и *влажностное содержание*. Приборы, использующие такой способ получения значений влажности, относительно просты и недороги. Однако, при всей привлекательности данного метода, у него есть ряд моментов, ограничивающих его применение. Отвлекаясь от физико-химических особенностей сорбционно-емкостных датчиков, остановимся на метрологической стороне их применения.

Измерители с емкостными датчиками имеют диапазон измерения относительной влажности 0-100% и погрешность 2-3%. Стандартная погрешность измерения температуры составляет 0,3-0,5°C. Про погрешность измерения других величин в паспортах приборов обычно ничего не говорится. В результате потребитель не имеет не только гарантированного значения погрешности, но даже какого-либо представления о ее возможном значении. Между тем, погрешность измерения различна для разных влажностных параметров и неочевидным образом связана с погрешностью измерения исходных величин - относительной влажности и температуры. Тем не менее, ее значение достаточно просто получается путем несложных математических выкладок. Поскольку такой анализ может быть полезен потребителям, он проведен в данном сообщении.

Во избежание недоразумений сразу же подчеркнем, что «погрешность измерения температуры» не есть «дополнительная температурная погрешность датчика влажности». Первая приводит к тому, что при вычислениях в приборе используется неправильное значение температуры. Эта погрешность присутствует при всех температурах, в том числе и при комнатной. Поэтому она влияет на значение *основной* погрешности всех влажностных величин, получаемых путем расчета из измеренных значений относительной влажности и температуры. Смысл второй погрешности выражается ее названием «дополнительная», то есть эта погрешность проявляется только при температурах, отличных от комнатной. Она обусловлена зависимостью параметров самого датчика влажности от температуры.

Абсолютная влажность (*a*).

Фактически это плотность водяного пара. Вычисляется по формуле:

$$a = \frac{21.67 \cdot \varphi \cdot E}{(T + 273.15)}, \quad \text{г/м}^2 \quad (1)$$

φ – относительная влажность (%), E – давление (кПа) насыщенных паров при температуре T (°C). Диапазон измерения равен:

$$\Delta a = \frac{2167 \cdot E}{(T + 273.15)} \quad (2)$$

Видно, что абсолютная влажность зависит как от относительной влажности, так и от температуры, в основном - через зависимость E от температуры. Поэтому приведенная погрешность измерения абсолютной влажности δa определяется погрешностью, как датчика влажности, так и датчика температуры:

$$\delta a = \delta \varphi + \beta_T \varphi \delta T \quad (3)$$

где $\delta \varphi$, δT – погрешности измерения относительной влажности и температуры, а величина $\beta_T = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_T$. В диапазоне от -50°C до +20°C значение β_T изменяется от 0,11/°C до 0,06/°C.

В (2) пренебрегается явной температурной зависимостью a , равной 0,003/°C.

Анализ формулы (3) показывает:

- при низких значениях абсолютной влажности ($\varphi \sim 0\%$)

$$\delta a \sim \delta \varphi$$

погрешность температурного датчика не оказывает заметного влияния на общую погрешность, которая в этом случае равна погрешности датчика влажности;

- при высоких значениях влажности ($\varphi \sim 100\%$)

$$\delta a \sim \delta \varphi + 6 \delta T$$

вклад температурного датчика значителен. Так, при погрешности измерения температуры 0,5°C он составляет 3%, что равно погрешности, вносимой датчиком относительной влажности.

Объемное влагосодержание (x).

Иными словами, это объемная концентрация пара по отношению к сухому газу. Вычисляется по формуле:

$$x = \frac{\varphi \cdot E}{P - 0.01 \cdot \varphi \cdot E} 10^4, \quad \text{млн}^{-1} \quad (4)$$

P – абсолютное давление газа (кПа). Диапазон измерения (при пренебрежении давлением паров по сравнению с общим давлением):

$$\Delta x = \frac{E}{P} 10^6 \quad (5)$$

Для измерения влагосодержания необходимо применение еще одного датчика – давления. Поэтому появляется дополнительный источник погрешности, а формула для приведенной погрешности δx принимает вид:

$$\delta x = (\delta\varphi + \beta\varphi\delta T + \varphi\delta P \frac{P_B}{P}) \frac{P_{\min}}{P} \quad (6)$$

δP , P_B , P_{\min} - приведенная погрешность (%), верхний предел измерения давления и минимальное значение давления соответственно. В дальнейшем будем считать, что диапазон *изменения* давления мал, поэтому $P \cong P_{\min}$.

Анализ формулы (6) показывает:

- при низких значениях абсолютной влажности ($\varphi \sim 0\%$)
 $\delta x \sim \delta\varphi$
- при высоких значениях влажности ($\varphi \sim 100\%$)

$$\delta x = \delta\varphi + \beta\delta T + \delta P \frac{P_B}{P_{\min}}$$

Вклад датчика давления минимален при малых влажностях и приближается к своему максимальному значению при высоких влажностях. При правильно подобранном датчике давления эту составляющую часть погрешности можно свести к значению, пренебрежимо малому по сравнению с остальными.

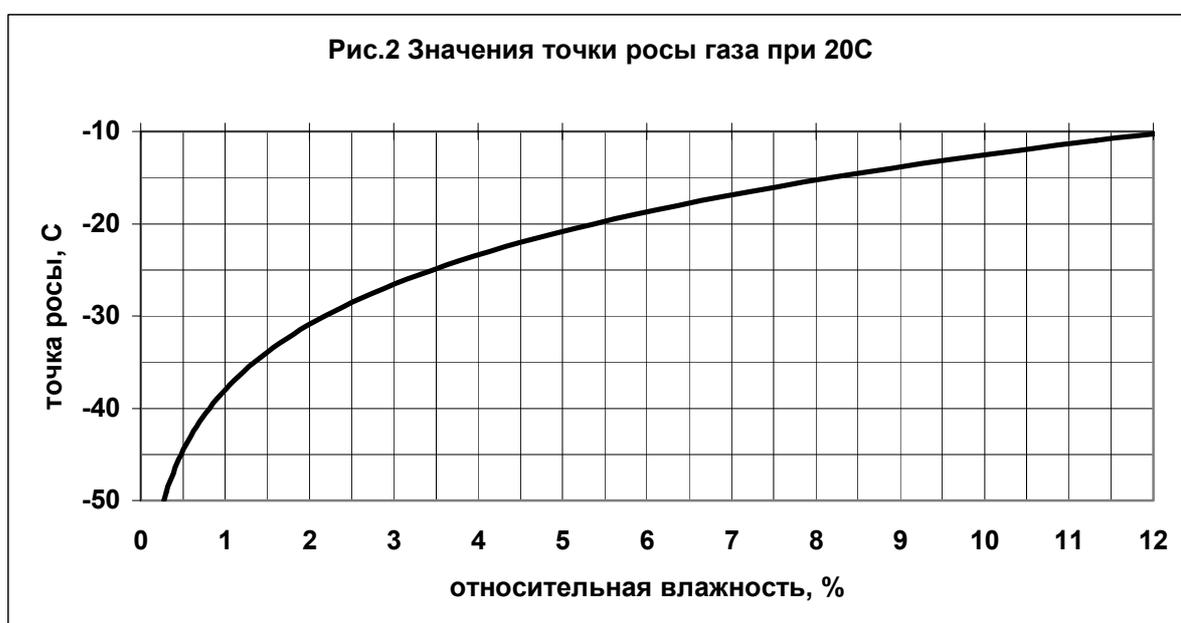
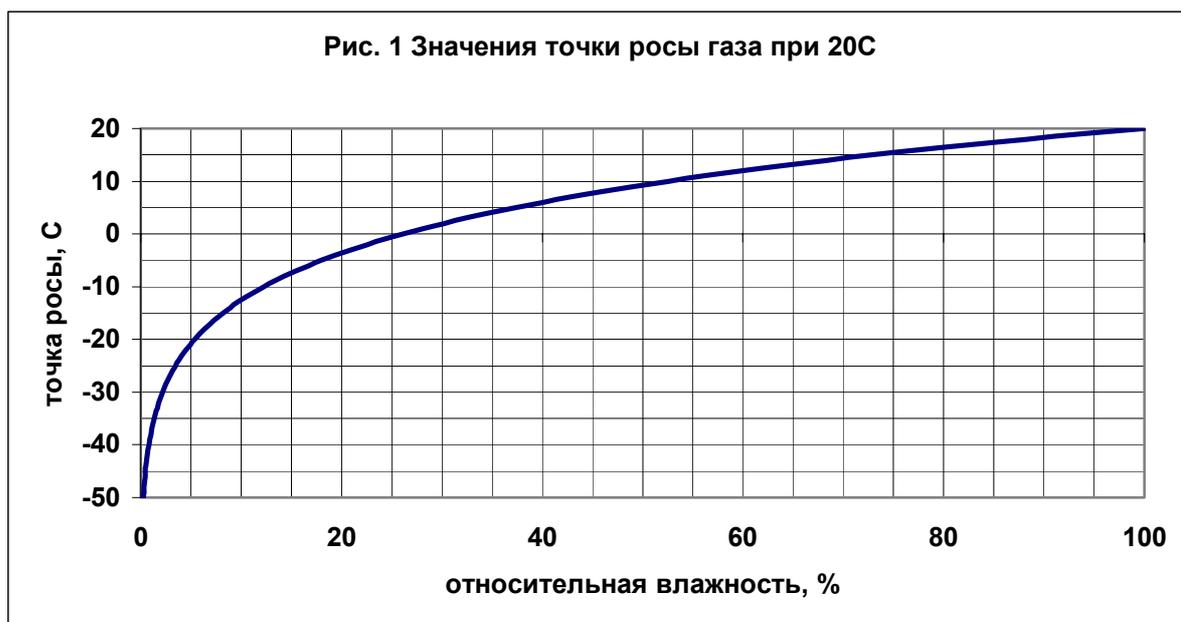
Точка росы (T_D).

Одна из важнейших величин, характеризующих влажность газа. Определяется как температура, при которой пар становится насыщенным, то есть относительная влажность достигает значения 100%. Понятно, что, чем ниже относительная влажность анализируемого газа, тем ниже его точка росы.

Математическое описание *абсолютной* погрешности δT_D выражается формулой:

$$\delta T_D = \frac{\delta\varphi}{\varphi} \cdot \frac{1}{\beta_{T_D}} + \delta T \cdot \frac{\beta_T}{\beta_{T_D}} \quad (7)$$

На рис.1 и рис.2 (часть рис. 1) показана зависимость точки росы от относительной влажности для газа, имеющего температуру 20°C. При уменьшении относительной влажности точка росы уменьшается по закону, близкому к логарифмическому. Видно, что вблизи $\varphi=100\%$ (в этом случае точка росы близка к температуре анализируемого газа) погрешность измерения относительной влажности в 1% приводит к погрешности точки росы в 0,16°C, а при $\varphi=2\%$ (точка росы порядка минус 30°C) погрешность вырастает до 5°C. Совершенно очевидно, что рассматривать погрешность измерения относительной влажности 2% при значении самой величины 2% не имеет смысла.



Важный комментарий.

Погрешность измерения точки росы датчиками относительной влажности зависит не от самой точки росы, а от того, насколько далеко она отстоит от температуры анализируемого газа, то есть от величины $T - T_D$, называемой дефицитом точки росы. Это видно и из формулы (7), где дефицит точки росы - «сухость» газа - проявляется через относительную влажность. Это означает, в частности, что погрешность измерения такого высокого значения точки росы, как $+20^{\circ}\text{C}$, для газа с температурой $+70^{\circ}\text{C}$, будет практически равна погрешности измерения столь малого значения, как минус 30°C , но для газа с температурой $+20^{\circ}\text{C}$. Ведь в обоих этих случаях дефицит точки росы одинаков. Другая ситуация. Погрешность измерения точки росы $+10^{\circ}\text{C}$ для газа с температурой $+20^{\circ}\text{C}$ значительно меньше, чем погрешность для газа с температурой $+50^{\circ}\text{C}$, так как в первом случае дефицит точки росы много меньше, чем во втором. Поэтому всегда, рассматривая погрешности, надо принимать во внимание не саму точку росы, а ее

дефицит. Также корректным будет определение параметров для фиксированной температуры анализируемого газа, например для 20°C.

Следует еще раз оговориться, что данные замечания справедливы только для приборов с датчиками *относительной влажности*.

Анализ формулы (7) показывает:

- при малом дефиците точки росы ($\varphi \sim 100\%$)

$$\delta T_D \sim 16 \frac{\delta \varphi}{\varphi} + \delta T$$

что при стандартных погрешностях $\delta \varphi = 3\%$ и $\delta T = 0,5^\circ\text{C}$ дает оценку вкладов датчиков влажности и температуры $0,5^\circ\text{C}$ и $0,5^\circ\text{C}$ соответственно.

- при большом дефиците точки росы ($\varphi \sim 0\%$)

$$\delta T_D \sim 10 \frac{\delta \varphi}{\varphi} + 0.6 \delta T$$

здесь вклад датчика температуры меньше ($0,3^\circ\text{C}$), а вклад датчика влажности в общую погрешность измерения точки росы катастрофически нарастает с понижением относительной влажности, что видно из графиков рис.1 и 2.

Измерение точки росы выше 20°C т.р.

Проблема здесь состоит в проведении поверки. Стандартная методика поверки многих приборов, не только измерителей влажности, предполагает проведение измерений в 5-ти точках, скажем 5, 25, 50, 75, 95% от диапазона измерений. Рассмотрим следующую ситуацию. Преобразователь влажности имеет диапазон минус 30...80°C т.р. При его поверке требуется провести измерение при 70-80°C т.р. Чтобы получить такое значение точки росы, необходимо, чтобы газ имел более высокую температуру. Метрологическое оборудование для этих температур является экзотикой. Кроме того, прибор при высокой температуре газа имеет дополнительную погрешность, обусловленную тем, что температура анализируемого газа отличается от нормальной (комнатной). Поэтому проводить его поверку в такой ситуации не совсем верно.

Между тем, некоторый выход из сложившейся ситуации возможен. Надо провести поверку прибора по относительной влажности и температуре, а затем на основе полученных значений погрешностей $\delta \varphi$ и δT определить погрешность измерения точки росы по формуле (7) с учетом того, что

$$\varphi = \frac{E(T)}{E(T_D)}$$

Однако здесь есть одно «но». Если производитель «зашил» в прибор неправильные значения $E(T)$ при $T > T_{\text{поверки}}$, то при предложенной методике это может пройти незамеченным.

Данная проблема в настоящее время не стоит очень остро, так как российских приборов, измеряющих высокое значение точки росы, практически нет, а зарубежные производители обычно не утруждают себя подобными «мелочами». Кроме того, наибольший интерес у потребителей вызывает измерение низких значений точки росы.

Датчики НС1000.

Для тех областей применения измерителей влажности, где необходимо измерять низкие значения точки росы или, следуя логике вышесказанного, при большом дефиците точки росы (более 30°C), наиболее важной частью характеристики датчика является диапазон 0-10% относительной влажности. Опыт работы с емкостными датчиками влажности показывает, что погрешность $\delta\varphi$ уменьшается с уменьшением φ (во всяком случае, здесь минимальна такая значительная составляющая погрешности, как гистерезис), а паспортное значение 2-3% - ее максимальное значение во всем диапазоне измерений.

Из формулы (7) видно, что наибольшее значение имеет погрешность при $\varphi = 0\%$. В результате многочисленных измерений установлено, что рядовая погрешность в этой области у датчиков НС1000 составляет 0,5%, что эквивалентно погрешности 2,5°C при минус 30°C т.р. Часть датчиков позволяет измерять и более низкие значения точки росы, однако для этого требуются длительные исследования их стабильности, что неизбежно приводит к удорожанию прибора. В некоторых случаях эта плата оправдана. Очевидно также, что при градуировке преобразователей нельзя обойтись без измерений при $\varphi = 0\%$. К счастью, эта точка достаточно легко реализуется в генераторах влажного газа типа «Родник-4» с применением осушки газа цеолитом.

ВЫВОДЫ:

1. *значительный вклад в погрешность измерения всех влажностных величин наравне с погрешностью измерения относительной влажности вносит погрешность измерения температуры;*
2. *возможно получение приемлемой погрешности (до 2°C) измерения точки росы при ее дефиците до 50°C.*

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РОСА-10.

Общие сведения.

1. Первичными преобразователями, входящими в состав Росы-10, являются емкостной датчик относительной влажности марки НС1000 и термометр сопротивления градуировки Pt500.
2. Прибор имеет два канала с выходными сигналами 4-20 мА (токовая петля). Сигнал каждого канала связан с одной из измеряемых величин – четырех видов влажности и температуры. Обычно 1-й канал настроен на влажность, 2-ой – на температуру. Каналы питаются от гальванически *несвязанных* блоков питания.
3. Роса-10, как дополнительную опцию, имеет жидкокристаллический индикатор. На нем выводится значение величины, связанной с 1-м каналом.
4. Имеются две кнопки корректировки 1-го токового выхода (минимум и максимум).
5. В Росе-10 для измерения влагосодержания предусмотрено измерение давления анализируемого газа путем измерения выходного тока 4-20 мА, поступающего от *внешнего* преобразователя давления.
6. С помощью специальной программы конфигурирования можно изменить настройки прибора. Конфигурирование включает в себя:
 - настройку каждого из каналов на любую измеряемую величину;
 - изменение диапазона преобразования величины в выходной ток;
 - изменение числа усреднений (времени демпфирования);
 - задание способа получения давления (см. ниже) и диапазона преобразования давления;

- изменение адреса прибора.

Программа также позволяет выводить в непрерывном режиме значения измеряемых величин (всех пяти) через СОМ-порт в виде таблицы и графика.

В случае если иное не оговорено в заказе, основные параметры конфигурации таковы:

- измеряемые величины – относительная влажность в 1-м канале и температура во 2-м канале;
- диапазоны преобразования – 0...100% и 0...100°C соответственно;
- число усреднений – 10 (время демпфирования ~ 5 сек);
- способ получения давления – ручной ввод, значение давления – 100 кПа.

Метрологические характеристики.

Таблица 1

Измеряемая величина	Условное обозначение величины	Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности γ , % от диапазона измерений			
			для унифицированного выходного сигнала		по измеряемой величине	
			А	Б	А	Б
Относительная влажность	φ	От 0 до 100 %	± 2 %	± 3 %	± 2 %	± 3 %
Абсолютная влажность (при $t = 20$ °С)	a	От 0 до 18 г/м ³ *	± 2 %	± 3 %	± 2 %	± 3 %
Объемное влагосодержание (при $t = 20$ °С и абсолютном давлении 100 кПа)	x	От до 28000 млн ⁻¹ *	± 2 %	± 3 %	± 2 %	± 3 %
Температура точки росы	T_D	От минус 30 до плюс 80 °С т.р.	± 1 °С** ± 2 °С*** ± 4 °С****	$\pm 1,5$ °С** ± 3 °С*** ± 6 °С****	± 1 °С** ± 2 °С*** ± 4 °С****	$\pm 1,5$ °С** ± 3 °С*** ± 6 °С****
Температура	T	От минус 40 до плюс 100 °С	$\pm 0,2$ °С	$\pm 0,3$ °С	$\pm 0,2$ °С	$\pm 0,3$ °С

Примечания: 1. Допускаемая основная погрешность измерения абсолютной влажности и влагосодержания γ_{II} , приведенная к диапазону преобразования, вычисляется по формуле

$$\gamma_{II} = \gamma \cdot \frac{D_{II}}{D_{II}}$$

где D_{II} и D_{II} – диапазоны измерений (при данных температуре и давлении анализируемого газа) и преобразования соответственно.

Диапазон преобразования может не совпадать с диапазоном измерений и устанавливается в соответствии с заказом на предприятии-изготовителе.

2. * При увеличении (уменьшении) температуры анализируемого газа (T) на 10°C диапазон измерений увеличивается (уменьшается) в 1,8 раза. При увеличении (уменьшении) давления в N раз диапазон измерения влагосодержания уменьшается (увеличивается) в N раз.

3. ** - для $T - T_D < 20$;

*** - для $20 < T - T_D < 50$;

**** - для $50 < T - T_D < 60$.

4. Для измерения абсолютного давления до 2,5 МПа применяют преобразователи давления АИР-20-ДА (модели 030, 040, 050 или 060 для соответствующих пределов измерений давления) производства НПП «Элемер».

Точка росы.

Диапазон измерения минус 30...20°C т.р. Погрешность измерения зависит от дефицита точки росы (см. выше).

Абсолютная влажность.

Диапазон измерения определяется температурой газа. При 20°C максимальная абсолютная влажность $\sim 18 \text{ г/м}^3$. При увеличении температуры на 10°C диапазон влажности увеличивается примерно в 1,8 раза. Погрешность остается равной 2-3%, но исчисляется уже от «нового», большего значения. Поэтому, будучи приведенной к «старому» диапазону, погрешность увеличивается и достигает 3,5-5,5%. Аналогично, при уменьшении температуры на 10°C, диапазон уменьшается и погрешность, приведенная к исходному диапазону, становится равной 1-1,5%.

Объемное влагосодержание.

Все сказанное про абсолютную влажность - о влиянии температуры и относительной влажности на диапазон измерения (здесь - $0-28000 \text{ млн}^{-1}$), о погрешности - относится и к влагосодержанию. Дополнительной проблемой является необходимость измерения давления. В Росе-10 предусмотрено два варианта учета давления.

- Первый предполагает, что давление газа известно заранее и практически не меняется. Тогда с помощью программы конфигурирования значение давления записывается в Росу-10 и при расчете влагосодержания оно учитывается. Здесь надо понимать, что вся погрешность *изменения* давления полностью войдет в погрешность измерения влагосодержания.
- Второй вариант учета давления состоит в его измерении. Роса-10 может измерять выходной ток 4-20 мА (токовая петля), поступающий от внешнего преобразователя давления. Для этого необходимо: а) подключить преобразователь давления к Росе-10, б) в программе конфигурирования выбрать соответствующий способ задания давления, а также задать пределы его преобразования, и записать их в прибор.

Надо помнить, что должно измеряться *абсолютное* давление.

Градуировка Росы-10.

Сложная и длительная процедура, выполняемая в два этапа. Вначале осуществляется градуировка по температуре, а затем – по относительной влажности. Количество экспериментальных точек: 3 – по температуре, до 12 (на прямом и обратном ходе) - по относительной влажности. После записи градуировочных коэффициентов в прибор проводится его калибровка в нескольких контрольных точках. Приборы класса А подвергаются дополнительным исследованиям с целью определения их долговременной стабильности.