

ретические значения и максимальные погрешности, определенные по приведенным формулам для полиномов первой степени, представлены в таблице. Отметим, что погрешность определяется не только выбранными функционалами, но и фигурами, предъявляемыми к распознаванию.

Результаты вычисления триплетных признаков

Фигура	Признак	Значение признака		Максимальная погрешность
		теоретическое	вычисленное	
Круг	Площадь	$\pi \cdot 150^2$	70809	163
	Диаметр	$2 \cdot 150$	301	1
Треугольник	Площадь	$\frac{\sqrt{3}}{4} \cdot 120^2$	6502	299
	Диаметр	$\frac{\sqrt{3}}{2} a$	106	4

Таким образом, методы стохастической геометрии позволяют найти новые конструктивные признаки распознавания со структурой в виде композиции трех функционалов — триплетные признаки. Ключевым элементом получения триплетного признака является геометрическое преобразование изображений.

Подход к формированию триплетных признаков на основе экстракции позволяет определить признаки, чувствительные к заданным геометрическим характеристикам распознаваемых изображений.

Теория триплетных признаков дает возможность получить большое количество признаков в режиме автоматической компьютерной генерации. Из полученного множества признаков с помощью процедуры минимизации отбираются наиболее информативные.

Методы стохастической геометрии обнаруживают высокую эффективность при распознавании сложноструктурированных изображений, таких как изображения из области медицинской диагностики.

Работа выполнена при поддержке INTAS (Ref. N 04-77-7036) и РФФИ (грант № 05-01-00991).

Литература

1. Федотов Н. Г. Методы стохастической геометрии в распознавании образов. — М.: Радио и связь, 1990.
2. Fedotov N. G., Kadyrov A. A. // Proc. SPIE 5th Intern. Workshop of Digital Image Processing and Computer Graphics DIP'94. — Samara, 1994. — V. 2. — P. 363.
3. Fedotov N. G. // Pattern Recognition and Image Analysis. — 1998. — V. 8. — N 2. — P. 264.
4. Федотов Н. Г., Никифорова Т. В. // Измерительная техника. — 2002. — № 12. — С. 27; Fedotov N. G, Nikiforova T. V. // Measurement Techniques. — 2002. — V. 45. — N 12. — P. 1247.
5. Fedotov N. G. e. a. // Proc. 2nd Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO — 2005. — Barcelona (Spain), 2005. — V. III. — P. 187.
6. Федотов Н. Г. и др. // Искусственный интеллект. — 2006. — № 2. — С. 117.
7. Vincent L. // IEEE Trans. Image Proc. — 1993. — V. 2. — N 2. — P. 176.
8. Fedotov N. G. e. a. // Pattern Recognition and Information Processing: Proc. 9th Intern. Conf. — Minsk, 2007. — V. 1. — P. 113.
9. Tou J., Gonzalez R. Pattern recognition principles. — Addison-Wesley, 1974.

Дата одобрения 31.07.2007 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.39:543.712

Измерение влажности при высоких давлениях

А. В. КРЮКОВ, К. В. КУРИЛЕНКО

Научно-производственное предприятие «Элемер», e-mail: elemer@elemer.ru

Создан калибратор влажности для измерений при давлении до 15 МПа. Показано влияние давления на характеристики емкостных сенсоров влажности. Предложен способ учета этого влияния. Описана процедура градуировки преобразователей влажности с емкостными сенсорами при высоком давлении.

Ключевые слова: емкостный сенсор влажности, давление, калибратор влажного газа.

The humidity calibrator for measurements under pressure up to 15 MPa is created. It was shown that the characteristics of the capacitive humidity sensors depend on pressure. The calculation method is given. The procedure of calibration of humidity transmitters with such sensors under high pressure is described.

Key words: capacitive humidity sensors, pressure, humidity calibrator.

Одна из основных задач гигрометрии — измерение влажности при давлении, заметно превышающем атмосферное. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью та-

ких измерений при добыче и перекачке природного газа. Главная измеряемая величина — температура точки росы, а наиболее точные устройства основаны на ее непосред-

ственном измерении. Однако такие устройства громоздки и дороги. Привлекает возможность применения достаточно дешевых микропроцессорных измерителей, в которых в качестве первичных преобразователей использованы емкостные сенсоры относительной влажности. Эти сенсоры на основе измеренных ими значений влажности и температуры вычисляют и выдают также и значения температуры точки росы в виде токового сигнала и (или) показаний индикатора. Однако влияние давления на применяемые в приборах сенсоры неизвестно и требует отдельных исследований. Кроме того, в связи с высокой востребованностью предназначенных для этих целей приборов актуальной является задача их проверки (калибровки) при рабочем давлении до 15 МПа.

Цель данной работы состояла в проверке влияния давления на емкостные сенсоры и определении способа коррекции их характеристик. Отметим, что сенсоры исследовали не как отдельные и самостоятельные устройства, а как входящие в состав измерительного преобразователя влажности и температуры РОСА-10. Поэтому характеристику сенсора определяли по выходному токовому сигналу преобразователя или показаниям его индикатора. Преимущество такого способа — удобство в работе, наглядность, а также то, что в преобразователь априори введена температурная коррекция параметров сенсора.

Экспериментальное оборудование. Среди метрологического оборудования наибольшее распространение в гигрометрии получили генераторы влажного газа, использующие методы двух давлений [1] или смешения сухого и влажного газов. Однако такие методы воспроизведения влажности не только не допускают проведения измерений при давлении свыше 0,3 МПа, но и не предполагают какого-либо его варьирования. В связи с этим был создан калибратор влажности, в основу работы которого положен метод двух температур [1], его схема приведена на рис. 1. Газ из баллона 1 при давлении до 17 МПа поступал через редуктор 2, понижавший давление до значения p , в устройство насыщения 3 с температурой T_K , и его влажность приближалась к 100 %. Затем в камере генератора 5, находящейся в термостате 6 при температуре $T_1 < T_K$, происходила конденсация избытка влаги и насыщение пара в газе до 100 %. В измерительной камере 8 термостата 7 при температуре T_2 относительная влажность газа составляла

$$\varphi_0 = \frac{E(T_1)Z(p, T_1)}{E(T_2)Z(p, T_2)} 100.$$

Здесь $E(T)$ — давление насыщенного пара при температуре T и атмосферном давлении порядка 100 кПа [2], $Z(T, p)$ — поправка на неидеальность газа [3], зависящая как от температуры, так и от общего давления газа p . Через редуктор 9 и капилляр 11, обеспечивающие постоянный заданный расход, газ сбрасывался в атмосферу. Фактически данный калибратор являлся калибратором температуры точки росы—инея $T_D = T_1$. Изменение относительной влажности (и точки росы—инея) осуществлялось путем изменения температуры T_1 . Преобразователи давления 4 и 10 предназначены для измерения давления на входе и выходе калибратора.

Термостат 6, охлаждение и нагрев в котором происходили с помощью элементов Пельтье, позволял получать значение точки росы от -45 до 50 °С с погрешностью не более $0,1$ °С. Данное значение включало в себя погрешности воспроизведения температуры в термостате и передачи ее анализируемому газу. Термостат 7 — жидкостный, температура в котором могла изменяться от комнатной до 100 °С. В измерительной камере одновременно могли размещаться четыре преобразователя влажности.

Значения температуры измеряли преобразователями ТПУ-0304 с погрешностью не более $0,05$ °С, а давления — преобразователями АИР-20 класса 0,1. Погрешность воспроизведения относительной влажности определялась упомянутыми выше погрешностями и не превышала $0,1—1$ % при изменении влажности от $0,5$ до 100 %. Все измерения, в том числе и выходного сигнала исследуемых преобразователей влажности, а также обработка результатов автоматизированы и осуществлялись с помощью 8-канального измерителя-регулятора ИРТ-5103 и специальной компьютерной программы.

Производитель всех средств измерений — НПП «Элемер».

Результаты измерений. Были исследованы четыре сенсора НС1000 (фирма Е+Е Elektronik) и три сенсора НН3602 (фирма Honeywell), являющиеся чувствительными элементами преобразователей влажности РОСА-10. Преобразователи предварительно отградуированы с помощью генератора влажного газа «Родник-4».

При четырех значениях относительной влажности 5, 22, 52 и 85 % снимали показания РОСА-10 в зависимости от давления газа. Графики изменения показаний $\varphi - \varphi'$ для одного из преобразователей (РОСА-10 № 167) с сенсором НС1000 приведены на рис. 2. Здесь φ, φ' — показания прибора при атмосферном давлении и давлении p , соответственно. При построении графиков и дальнейшей обработке данных вносили поправки на изменение генерируемого (эталонного) значения влажности, которое происходило вследствие изменения как давления (через зависимость $Z(p, T_1) / Z(p, T_2)$ от давления), так и температур T_1 и T_2 .

Из рис. 2 следует, что представленные зависимости нелинейны и различны для разных значений воспроизводимой влажности. Кроме того, эти зависимости индивидуальны для каждого из исследованных сенсоров. Это обстоятельство, а также сам факт влияния давления на сенсоры могут поставить под сомнение возможность их

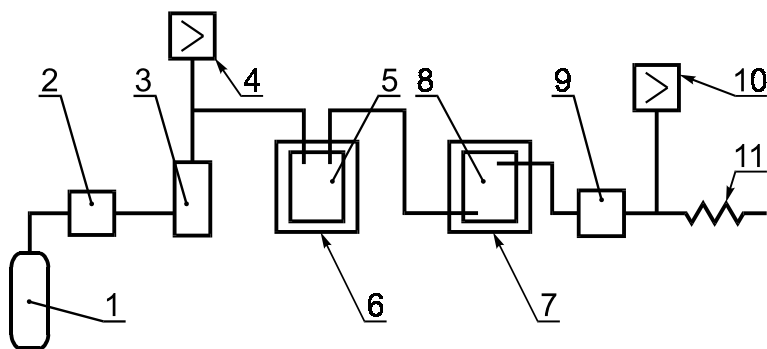


Рис. 1. Схема калибратора влажности:

1 — баллон; 2, 9 — редукторы; 3 — устройство насыщения; 4, 10 — преобразователи давления; 5 — камера генератора; 6, 7 — термостаты; 8 — измерительная камера; 11 — капилляр

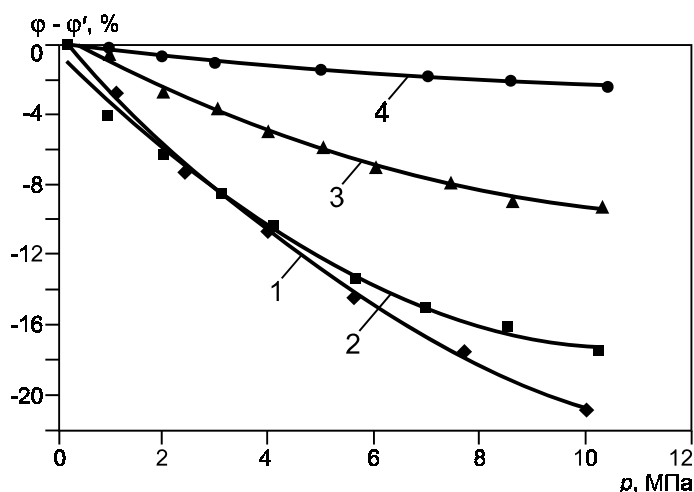


Рис. 2. Влияние давления на емкостные сенсоры относительной влажности:
1 — 85 %; 2 — 52 %; 3 — 22 %; 4 — 5 %

использования при давлениях, в 10 и более раз превышающих атмосферное. Однако тщательный анализ и правильная обработка экспериментальных данных позволяют в значительной степени компенсировать этот недостаток.

Обработка результатов измерений. Не обсуждая физико-химических причин влияния давления на сигнал сенсора (емкость), рассмотрим математическое описание этого явления.

Анализ зависимостей, показанных на рис. 2, приводит к необходимости перехода к другим координатам. На рис. 3 представлены графики зависимости отношения ϕ / ϕ' от давления для того же преобразователя № 167. В пределах погрешности измерений данную зависимость можно считать линейной:

$$\phi / \phi' = 1 + Ar. \quad (1)$$

Как следует из рис. 3, коэффициент A (наклон прямой) зависит от измеряемой влажности. В первом приближении эта зависимость также линейна:

$$A = a_0 + a_1\phi. \quad (2)$$

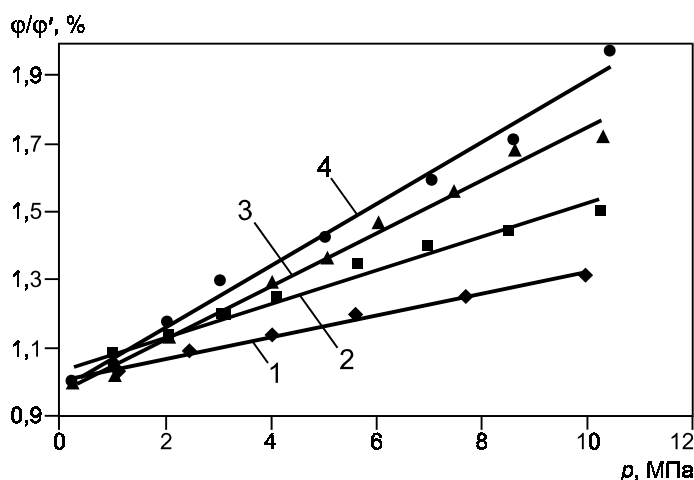


Рис. 3. Зависимость отношения ϕ / ϕ' от давления при влажности:
1 — 85 %; 2 — 52 %; 3 — 22 %; 4 — 5 %

Из (1) и (2) получим

$$\phi = \phi' \frac{1 + a_0 p}{1 - a_1 \phi' p}. \quad (3)$$

Обсуждение результатов. Чтобы оценить адекватность предложенной модели, для упомянутых выше четырех сенсоров НС1000 методом наименьших квадратов были получены коэффициенты a_0 и a_1 . Затем с помощью (3) по показаниям ϕ' при разных значениях давления и воспроизводимой влажности вычислены «правильные», скорректированные показания ϕ_1 . Погрешность описания в виде графиков отклонений $\Delta\phi = \phi_1 - \phi$ приведена на рис. 4. Наибольшая погрешность наблюдалась при высоких значениях влажности и не превышала 2,5 % для всех сенсоров. При влажности 5 % погрешность составила менее 0,3 %. То, что погрешность минимальна при небольших влажностях, представляется чрезвычайно важным, так как предполагаемая область применения приборов — измерения низких значений точки росы (и относительной влажности) перекачиваемого природного газа.

Отметим, что погрешность может быть уменьшена путем введения в (1) и (2) квадратичных членов. Однако это приведет к усложнению и удлинению процедуры градуировки и обработки результатов и соответственно к ее удорожанию, что иногда и оправданно.

Описанный метод учета влияния давления относится к отградуированным при атмосферном давлении приборам, в противном случае можно совместить градуировку по влажности с измерениями по давлению. В первом же случае упрощенная процедура коррекции выходного сигнала состоит в проведении при двух значениях воспроизводимой влажности (например, 10 и 80 %) измерений в двух точках по давлению (например, при минимальном и максимальном) для каждого значения влажности.

Способ внесения поправки на влияние давления может быть разным, вплоть до ручного расчета. В микропроцессорных преобразователях давления РОСА-10 имеется канал измерения силы тока 4—20 мА от внешнего преобразователя давления, что дает возможность наряду с влажностью и температурой измерять и давление. В результате РОСА-10 в комплекте с преобразователем давления позволяет автоматически получать скорректированные в соответствии с (3) значения влажности в широком диапазоне давлений 0—15 МПа.

К сожалению, конструкция преобразователей РОСА-10 с сенсорами НН3602 в силу специфики последних не позво-

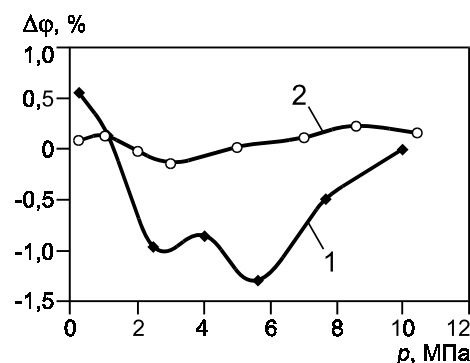


Рис. 4. Погрешность расчета влияния давления при влажности:
1 — 85 %; 2 — 5 %

лила провести измерения в том же объеме, что и для НС1000. Однако в диапазоне до 3 МПа поведение НН3602 в значительной степени совпадает с поведением НС1000. Более того, коэффициенты a_0 и a_1 , усредненные по четырем сенсорам НС1000, описывают влияние давления на НН3602 с погрешностью менее 3 %. Это не кажется удивительным, так как оба вида сенсоров схожи по своим физико-химическим параметрам.

Таким образом, в результате проделанной работы создан калибратор влажности с диапазоном воспроизводимых температур точки росы от -45 до 50 °С с погрешностью $0,1$ °С точки росы при давлениях до 15 МПа. Показано, что выходной сигнал емкостных сенсоров относительной влажности зависит от давления. Предложено математическое описание этой зависимости и способ ее реализации в преобразователях влажности и температуры типа РОСА-10.

В заключение отметим, что несмотря на достаточно хорошее описание экспериментальных данных (3), огромное значение имела бы физико-химическая трактовка данного явления. Это позволило бы с большей уверенностью изменить формулу, а может быть и уточнить ее.

Л и т е р а т у р а

1. Берлинер М. А. Измерения влажности. — М.: Энергия, 1973.
2. Sonntag D. Z. // Meteorology. — 1990. — V. 70. — N 5. — P. 340.
3. Hyland R. W. // J. Reseach NBS. — 1975. — V. 79A. — P. 551.

Дата одобрения 07.06.2007 г.

621.3.08

Сравнительный анализ моделей диэлектрических свойств почвы при автогенераторных измерениях влажности

В. Г. ЛИСИЧКИН, С. Н. ШВЕДОВ

Академия ФСО России, e-mail: lisichkin@rekom.ru

Предложен полупирический подход к выбору модели для реализации автогенераторных измерителей влажности на основе анализа существующих математических описаний диэлектрических свойств почвы.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, поляризация, емкостный датчик.

Semiempirical approach to a choice of model for realization of autogenerating measuring instruments of humidity on the basis of analysis of existing mathematical descriptions dielectric properties of ground is offered.

Key words: dielectric permittivity, polarization, capacity sensor.

Задача измерения влажности различных материалов и веществ является актуальной уже много десятков лет, для ее решения разработано большое количество разных методов. Измерение влажности почвы сопряжено с определенными трудностями, поскольку почва в самом общем случае — сложная многокомпонентная гетерогенная система, в которой вода как один из компонентов может находиться в различных фазовых состояниях.

Все методы измерения влажности принято делить на прямые и косвенные. В прямых методах проводят непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу, в частности, весовым способом. В косвенных методах измеряют физическую величину, функционально связанную с влажностью материала. Наибольшее распространение получили косвенные методы, основанные на измерении электрических параметров почвы, зависящих от влажности: сопротивления или проводимости (кондуктометрические методы), диэлектрической проницаемости (диэлькометрические методы). Диэлькометрические методы обладают большими преимуществами по сравнению с другими: быстродей-

ствием, относительно легкой автоматизацией процесса измерения, возможностью проведения неразрушающего контроля и высокой повторяемостью результатов. Для измерения диэлектрической проницаемости почвы чаще всего применяют автогенераторные методы [1], когда измеряемая величина влияет на частоту или иной параметр частотного генератора, а в качестве первичного измерительного преобразователя, как правило, используют емкостный датчик. Емкость C датчика связана с измеряемым параметром соотношением

$$C = g \epsilon_x \epsilon_0,$$

где g — геометрический фактор, учитывающий конструктивное выполнение емкостного датчика; ϵ_x — относительная диэлектрическая проницаемость измеряемой среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость в вакууме.

Серьезная проблема в теории диэлектрических методов — создание достаточно точных математических моделей, опи-