

Кабельный датчик влажности*В. С. Кондратенко, Ю. И. Сакуненко, В. Н. Тикменов*

Предложена конструкция кабельного 3D-сенсора, позволяющего получать информацию о влажности воздуха не только в отдельной точке, как это делают сегодня абсолютно все существующие датчики влажности, но и по всему объёму пространства, в котором размещён этот кабельный сенсор. «Рабочий» объём и сенсорная площадь таких сенсоров в тысячи раз выше, чем у применяемых сегодня точечных сенсоров.

Ключевые слова: влажность, датчик влажности, кабельный датчик, сенсорная площадь, объём.

Введение

Измерение влажности или определение абсолютного или относительного содержания воды в воздухе является чрезвычайно важным не только для поддержания комфортных условий жизни человека, но и для функционирования множества различных технологических процессов и производств, например, сушка, увлажнение, полив и др.

Добываемый из недр природный газ буровально насыщен водяными парами и поэтому не может сразу поступать в трубы для транспортировки, так как водяной пар будет конденсироваться и инициировать разрушительные процессы коррозии в трубах. Поэтому газ предварительно должен быть «осушен», для чего на месторождениях строятся дорогостоящие осушительные сооружения. Затем непрерывно, на каждом этапе транспортировки этого газа определяется фактическое содержание влаги, выражаемое обычно через так называемую «точку росы». Поэтому датчики влажности являются критически важными элементами для газовой индустрии.

Известно также, что реально решение продуктовой проблемы для человечества напрямую связано с расширением оптимальных систем искусственного орошения. Наиболее яркий пример этому – технология систем «капельного» полива,

где именно благодаря работе датчиков влажности почвы стала возможным автоматизация полива и решительное сокращение расходов воды.

Сегодня существуют тысячи различных конструкций датчиков влажности, базирующихся на различных принципах измерений. В основном это миниатюрные и сравнительно дешёвые датчики, работающие на принципах сорбционного импеданса (изменения электрических емкостей и сопротивлений измерительных цепей), а также термисторные датчики, оптические конденсационные датчики, являющиеся наиболее точными, но одновременно и наиболее дорогими, а также другие типы датчиков.

Заметим, что все эти датчики являются точечными. Рабочие, т. е. функциональные элементы этих сенсоров имеют незначительные размеры. Например, емкостные и резистивные датчики имеют сенсорные площади 5–30 мм², а толщины 200–600 Å, то есть их рабочий, анализирующий объём не превышает десятых долей кубического миллиметра.

Такая оценка влажности по одной точке в реальных помещениях и процессах, где, как правило, наблюдаются значительные градиенты влажности из-за сквозняков, перепадов температур и других факторов, не является корректной во многих случаях. Именно поэтому при проектировании, как правило, предусматривается установка нескольких точечных датчиков влажности на различных расстояниях и высотах, а также применение специальных алгоритмов их обчёта. Это, в свою очередь, приводит к усложнению и удорожанию проектов. В связи с этим оптимальным решением представляется создание и применение датчиков со значительно увеличенным рабочим, функциональным объёмом сенсоров.

Целью данной работы является представление нового типа датчика влажности, а именно, кабельного типа датчика [1, 2], позволяющего полу-

Кондратенко Владимир Степанович¹, профессор, д.т.н.

Сакуненко Юрий Иванович², зав. лаб., к.т.н.

Тикменов Владимир Николаевич³, ген. дир., д.т.н.

¹ Московский технологический университет МИРЭА.

Россия, 107996, Москва, ул. Стромынка, 20.

E-mail: vsk1950@mail.ru

² ООО «Инжиматик», резидент «Сколково».

Россия, Москва, Сиреневый бульвар, дом 59, стр. 1

³ АО «Научно-технический центр «Элинс».

Россия, Москва, г. Зеленоград, пр-кт Панфиловский, д. 4, к. 1,

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.

чать информацию о влажности воздуха не только в отдельной точке, как это делают сегодня абсолютно все существующие датчики влажности, но и по всему объёму пространства, в котором размещён этот кабельный сенсор.

Кабельный датчик влажности

В основу кабельного датчика влажности положена конструкции сорбционного гидросенсорного кабеля [3–8].

Датчик (см. рис. 1) представляет собой кабель, состоящий из одной или пучка медных жил 1 с оболочкой 2 из высокоэлектропроводящей пластмассы. Поверх этой полимерной оболочки расположена капиллярно-пористая оболочка 3, например, из стекловолокна или полимерных волокон. Вся эта конструкция размещена в металлическом экране 4 из тонких металлических проволок или электропроводящего углеволокна.

Такая конструкция представляет собой, по существу, длинный цилиндрический конденсатор. Роль конденсаторных пластин в этом конденсаторе выполняют внутренняя поверхность металлического экрана 4 и внешняя сторона электропроводящей полимерной оболочки 2. Роль диэлектрической прокладки внутри этого конденсатора выполняет капиллярно-пористая оболочка 3. В силу своей конструкции и технологии изготовления такой «кабель-конденсатор» может иметь практически любую длину, легко изгибается,

устойчив к внешним механическим воздействиям и вибрации.

Рассмотрим принцип работы кабельного датчика влажности. Если поместить такой кабель во влажный воздух, то находящиеся там молекулы воды 5 взаимодействуют с ним и, проникая через ажурный металлический экран 4, сорбируются внутри капиллярно-пористой оболочки 3, изменяя при этом её диэлектрическую постоянную. Это приводит к изменению величины измеряемой электрической ёмкости такого кабеля.

Таким образом, изменение влажности окружающего кабель воздуха приводит к пропорциональному изменению его суммарной (по объёму!) электрической ёмкости, а, следовательно, сам кабель может быть использован в качестве протяжённого датчика влажности.

Справедливость такого вывода подтверждается проведёнными экспериментами по определению электрических характеристик опытных образцов кабельного датчика влажности с внешним диаметром 4,2 мм, результаты которых представлены в табл. 1. Регистрировалось изменение ёмкости и сопротивления кабеля при его последовательном помещении в зоны с разной влажностью: зона 1 – комната с влажностью 35 %; зона 2 – сосуды с NaCl (75 % влажность); зона 3 – камера со 100%-ой влажностью.

На рис. 2 представлен результат изменения во времени ёмкости кабельного датчика длиной 60 см при его помещении в зоны с различной влажностью.

Рис. 1. Конструкция (а) и фотография (б) кабельного датчика влажности.

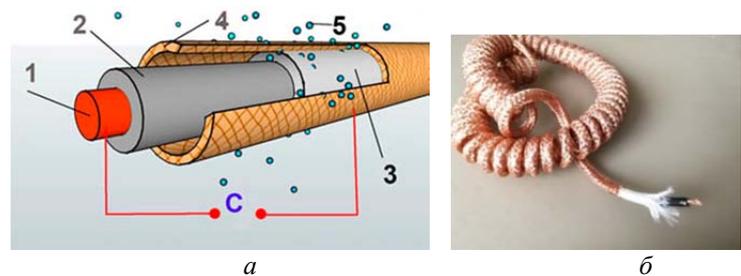
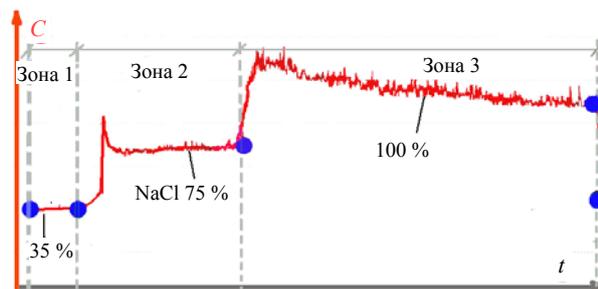


Таблица 1

Электрические характеристики кабельного датчика влажности в зависимости от влажности различных сред

	Влажность среды		
	Зона 1 – 35 %	Зона 2 – 75 %	Зона 3 – 100 %
Сопротивление R , МОм	60	6	3
Ёмкость C , мкФ	0,330	2,3	5,2

Рис. 2. Изменение во времени ёмкости C (в относительных единицах) в трёх зонах с различной влажностью.



Как видно из табл. 1, в испытанной конструкции кабельного датчика влажности зарегистрировано резкое увеличение электрической ёмкости при увеличении влажности среды.

Благодаря протяжённой длине конструкции кабельного датчика его внешняя сенсорная площадь и эффективный сенсорный объём, захватывающий молекулы воды, в тысячи раз может превышать аналогичные характеристики всех известных сегодня сенсоров влажности.

Как видно из представленных в табл. 2 данных, контактирующая с анализируемым воздухом внешняя, т. е. сенсорная площадь у кабельных сенсоров как минимум в 10 тысяч раз больше, чем у традиционных точечных сенсоров.

Важнейшей характеристикой сенсора является объём его рабочей сенсорной зоны, которая дает информацию о влажности окружающего воздуха. При увеличении этого объёма пропорционально увеличивается и количество находящихся в них анализируемых молекул воды, что, соответственно, повышает достоверность получаемой информации о влажности. По этому важнейшему показателю кабельные сенсоры в миллионы раз превосходят существующие точечные датчики.

Этот параметр позволяет расширить, по сравнению с известными точечными датчиками, объёмы контролируемого ими пространства в помещениях и увеличить надёжность этих измерений.

В силу своей конструкции кабельный датчик влажности впитывает молекулы воды буквально каждым квадратным миллиметром своей поверхности по всей своей длине кабеля. При этом изменение электрической ёмкости этих отдельных участков различно и напрямую связано с фактической окружающей именно этот участок концентрацией молекул воды. Измеряя общую электрическую ёмкость датчика, мы фактически получаем интегрированный по всей длине кабеля сигнал, пропорциональный средней влажности по длине кабеля.

На практике всё сказанное означает, что в случаях, когда необходимо знать среднюю по контролируемому объёму влажность воздуха, например, при кондиционировании помещений, один такой кабельный датчик заменяет собой несколько традиционных точечных сенсоров с протяжёнными линиями их коммуникаций и алгоритмами, обрабатывающими и усредняющими поступающую от них информацию о влажности.

Таблица 2

Сравнение размеров сенсорных площадей и объёмов для сенсоров влажности разных видов

Вид датчика / модель	Параметры рабочей зоны сенсора		
	площадь поверхности S , мм ²	толщина слоя l , мм	Объём сенсорной зоны V , мм ³
Конденсаторный/ 1Н6131 (USA)	4	4×10^{-4}	0,002
Конденсаторный/ ЭКСИС (Россия)	25	1×10^{-3}	0,02
Резистивный DHT22	15	10^{-3}	0,02
Термисторный	5	2×10^{-3}	0,01
Оптический/«Прима-10» (Россия)	900	1	900
Кабельный датчик влажности*	52 000	0,14	7 300

* Расчёты приведены для кабеля длиной 3 м и диаметром 2,8 мм.

Кабельные агросенсоры влажности

Очевидно, одним из перспективных направлений использования кабельных датчиков влажности является их применение в системах искусственного орошения, в том числе и в бурно развивающихся в настоящее время системах капельного орошения.

Регулярность включения подачи воды в таких системах в большинстве случаев сегодня связано не с фактической влажностью почвы, а с управляющей программой по составленному заранее расписанию, например, каждые 6 часов по часу полива. Понятно, что при таком расписании полива возникают ситуации с недоувлажнением или переувлажнением почвы.

В странах с засушливым климатом (Израиль, Саудовская Аравия и др.), где вода в большой цене и её расточительство неприемлемо в принципе, начало и продолжительность поливов определяются исходя из фактических показаний датчиков влажности установленных в разных точках орошаемых площадей.

Так как все существующие сегодня датчики влажности являются точечными, установка даже минимально необходимых количеств таких датчиков, например, 4–6 датчиков на гектар, требует либо создания 4–6 линий их постоянной коммуникации и установку специализированного процессора, либо создания дорогостоящих беспроводных систем передачи и анализа этих данных.

Альтернативой таким решениям является прокладка на искусственно орошаемых площадях кабельных агросенсоров влажности. Они состоят из перфорированных гофрированных пластмассовых шлангов с проложенными внутри описанными выше кабельными датчиками влажности воздуха. Задача внешнего гофрошланга – не допустить заиливания сенсорного элемента. Будучи закопанным на определённой глубине, кабельный агросенсор измеряет усреднённую влажность окружающей почвы.

В случае расположения кабельного датчика по всей площади полива, один такой сенсор выдаст информацию о средней, т. е. наиболее важной для оптимизации режимов полива влажности по всей длине кабеля. Таким образом, один такой кабель заменяет собой десятки традиционных точечных гидросенсоров, соответственно существенно удешевляя систему контроля и оптимизируя алгоритмы полива.

Мониторинг влажности природных газов

В силу физических принципов, заложенных в основу работы кабельных датчиков, все они способны определять влажность не только воздуха, но и практически любых других газов, в том числе и природных.

Известно, что природный газ, добытый из газовых и газоконденсатных месторождений в условиях наличия пластовой и связанной воды, сильно насыщен парами влаги. В случае конденсации, эта влага снижает пропускную способность трубопроводов и других промышленных сооружений, приводит к образованию гидратов, накоплению их и даже к полному перекрытию проходного сечения труб и арматуры. Кроме того, образовавшийся конденсат вызывает разрушительные процессы коррозии. Именно этим обусловлено внимание, которое уделяется в газовой промышленности непрерывному контролю влажности транспортируемых газов. Традиционно контроль осуществляется в самых ответственных местах посредством надёжных, высокоточных и, кстати, весьма дорогостоящих оптических конденсационных методов определения влажности, требующих к тому же создания для них специальных внешних отводных линий.

Разработанные кабельные датчики влажности могут быть размещены непосредственно внутри газотранспортных труб, либо внутри других труднодоступных зонах технологического оборудования.

Из-за практически ничем не ограниченной длины кабеля, наши датчики могут быть легко смонтированы и постоянно (т. е. в режиме on line)

передавать оперативную информацию об отклонении в значениях среднего влагосодержания фактически по всей длине самых протяжённых линий. Специальная модификация наших кабельных датчиков способна сигнализировать о фактах возникновения такого неприятного для трубопроводной техники явления, как конденсация влаги внутри газоперекачивающего оборудования.

Другие примеры применения кабельных датчиков влажности

Переход от существующих точечных датчиков к кабельным датчикам, выполняющим по существу функции объёмных 3D-датчиков влажности, резко увеличивает объём технологического пространства, контролируемого одним датчиком. Это представляет проектантам новые, менее затратные возможности для создания физически более обоснованных алгоритмов регулирования многочисленными технологическими процессами используемыми показателями влажности. Эта оптимизация, в свою очередь, должна способствовать увеличению их производительности и снижению затрат.

Возможными примерами такого применения разработанных датчиков могут быть следующие области деятельности.

– **Бытовое и промышленное кондиционирование воздуха.** Особенно важно это при необходимости поддержания в помещениях строго фиксированных значений влажности (электронная, фармацевтическая, химическая, текстильная, пищевая и другие отрасли промышленности).

– **Обнаружение мизерных (следовых) количеств водяного пара.** Во многих технологических процессах, а именно: ядерная энергетика, микроэлектроника, металлургия редких металлов, теплотехника, электроэнергетика высоких напряжений, необходимо избегать присутствия следовых количеств водяного пара как в воздухе, так и в других газах (углекислый газ, гексафторид серы и т. д.). Избыток водяного пара здесь может привести к нежелательным побочным реакциям.

– **Эксплуатация теплообменников.** Многие теплообменники используют явления массопереноса, связанного с испарением воды (градирни, скрубберы) или с конденсацией водяного пара (холодильные батареи, испарители кондиционеров, тепловых насосов). Эти виды теплопереноса и их эффективность напрямую связаны с влажностью воздуха.

– **Контроль сушильного оборудования.** Влажность воздуха на выходе из сушильни является очень важным параметром ее энергопотребления. В работе сушильни до 80 % потерь тепла

связано с уходящим воздухом. Поэтому выгодно осуществлять процесс сушки при минимальном расходе воздуха, но с максимально возможной его влажностью на выходе.

Заключение

Разработанный и представленный в данной статье новый тип кабельного датчика влажности имеет ряд неоспоримых преимуществ перед известными точечными сенсорами влажности. Важнейшими преимуществами является практически неограниченная протяженность кабельного датчика, широчайший диапазон измерения влажности (от единиц процентов влажности до полного залива датчика), универсальность и простота прокладки и эксплуатации такого датчика влажности. Вода – это самая распространённая на Земле жидкость, поэтому вышеприведённые примеры применения новых разработанных кабельных датчи-

ков влажности далеко не исчерпывают перечень всех возможных сфер их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2018104565. Датчик влажности. Приор. 06.02.2018.
2. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. Патент РФ № 2018104563. Датчик влажности. Приор. 06.02.2018.
3. Сакуненко Ю. И., Кондратенко В. С. Патент РФ № 2536766. Мультисенсорный датчик критических ситуаций. Приор. 17.12.2013.
4. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2014. № 10. С. 10.
5. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Бурляй Д. А. // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 2. № 3(8). С. 12.
6. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2015. № 2. С. 42.
7. Кондратенко В. С. // РИТМ машиностроения. 2016. № 1. С. 50.
8. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. Патент РФ № 201712 0556. Датчик утечек электропроводящих жидкостей. Приор. 14.06.2017.

PACS: 07.07.-a

Cable humidity sensor

V. S. Kondratenko¹, Yu. I. Sakunenko², and V. N. Tikmenov³

¹Moscow Technological University MIREA
20 Stromynka str., Moscow, 107996, Russia
E-mail: vsk1950@mail.ru

²Engimatik, LLC, a Resident of Skolkovo
Bld. 1, 59 Sirenevyyi Boulevard, Moscow, Russia

³Elins Science-Technical Center, JSC
Bld. 1, 4 Panfilovskii av., Zelenograd, Moscow, Russia

Received March 15, 2018

Consideration is given to the design of a cable 3D sensor that allows obtaining information on air humidity not only at a single point, as it is done today by absolutely all existing humidity sensors, but also throughout the volume of space, in which this cable sensor is placed. The "working" volume and sensor area of such sensors is thousands of times higher than that of the point sensors used today.

Keywords: humidity, humidity sensor, cable sensor, volume.

REFERENCES

1. RF Patent No. 2018104565 (2018).
2. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, RF Patent No. 2018104563 (2018).
3. Yu. I. Sakunenko and V. S. Kondratenko, RF Patent No. 2536766 (2013).
4. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, RITM, No. 10, 10 (2014).
5. V. S. Kondratenko, Yu. I. Sakunenko, and D. A. Burlyai, Vestnik MIREA 2 (3), 12 (2015).
6. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, RITM, No. 2, 42 (2015).
7. V. S. Kondratenko, RITM, No. 1, 50 (2016).
8. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, RF Patent No. 201712 0556 (2017).