

## **Сорбционно-емкостный датчик влажности газов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Предложена новая конструкция первичного измерительного преобразователя влажности газов, полученная путем усовершенствования готового преобразователя, конструкция которого имеет три варианта исполнения. Новизна заключается в добавлении во вторую обкладку пазов прямоугольной формы, что позволяет существенно увеличить значение пространственной характеристики. Описанное техническое решение дало возможность обеспечить более высокую точность и чувствительность первичного преобразователя.

**Ключевые слова:** первичный преобразователь, влажность газа, шелковая изоляция.

### **1. Постановка проблемы**

В последние несколько лет актуальность рационального использования ресурсов и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу при производстве тепловой энергии резко возросла. Цены на энергоресурсы имеют высокую динамику роста, что серьезно сказывается на себестоимости производства тепловой энергии и вызывает необходимость ее экономии.

Другая сторона вопроса - загрязнение окружающей среды продуктами сгорания. Часто данная сторона проблемы усложняется тем, что объекты энергетической отрасли находятся в густонаселённых районах и букет выбросов (окислы азота, окислы серы, канцерогенные вещества, продукты неполного сгорания), которые содержатся в дымовых газах, является экологически опасным для окружающей среды и здоровья человека.

Для борьбы с образованием оксидов азота при сжигании природного газа в настоящее время широко применяют методы, основанные на вводе влаги в топочную камеру парового котла. Ввод добавочной влаги или локальный дозированный впрыск воды в зону горения топлива оказывает влияние на весь комплекс физико-химических и тепломассообменных процессов, происходящих в топке котла, и прежде всего на процесс лучистого теплообмена. Изменение интенсивности лучистого теплообмена в этих условиях может произойти из-за изменения температуры газов, концентрации излучающих компонентов, процессов загрязнения экранов, которое влияет как на процесс подавления оксидов азота, так и на надежность работы высокотемпературных поверхностей нагрева парового котла.

Реализация данного метода состоит из нескольких этапов: измерение влажности поступающего газа, расчет значения добавляемой влаги, добавление воды в топочную камеру котла.

### **2. Анализ исследований и публикаций**

Важным этапом в применении метода сжигания газа с добавлением влаги является измерение влажности газа. Это обусловлено узким коридором значений удельной влажности газа, при котором наблюдается положительный эффект.

Из множества методов определения влажности газа был выбран сорбционно-емкостный метод, основанный на пропорциональной зависимости изменения емкости от диэлектрической проницаемости сорбента.

Определяющими преимуществами метода являются широкие пределы измерения, малая инерционность, высокая точность, простота исполнения и стабильность. Кроме того, емкостной метод широко применяется в сельском хозяйстве для измерения влажности зерна, в промышленности для измерения влажности нефти, мазута и др.

Ранее на кафедре был разработан емкостный датчик влажности [1], построенный на основе того же принципа измерения. Его конструкция более сложна и обеспечивает высокую начальную емкость (776 пФ) и чувствительность (3,35 пФ/%). Датчик представляет собой две системы электродов с нанесенным шелковым покрытием, помещенных в измерительную и образцовую камеры. Обе системы электродов с помощью диэлектрических перемишек жестко закреплены на внутренней поверхности двух диэлектрических колец. Перед образцовой камерой газ попадает в поглотитель влажности. Таким образом исключаются погрешности от изменения температуры, давления и состава газа.

В качестве прототипа для разработанного датчика взят емкостный сорбционный датчик влажности газов [2], имеющий три конструктивных исполнения.

### 3. Цели статьи

Повысить основные характеристики представленного прототипа – емкостного сорбционного датчика влажности газов. Рассчитать начальную емкость и чувствительность всех вариантов исполнений датчика. Расчетным путем доказать состоятельность технического решения.

### 4. Основной материал

Емкостный сорбционный датчик влажности газов основан на принципе пропорциональной зависимости емкости от влажности измеряемой среды. Главной новизной является применение одножильных и многожильных проволок, изолированных и не изолированных лаком и покрытых шелковой изоляцией в качестве обкладок емкостного сорбционного датчика. Изоляция из шелка отличается хорошей сорбционной способностью и позволяет существенно увеличить емкость и чувствительность датчика.

Первая конструкция емкостного сорбционного датчика влажности газа показана на рис.1 [2].

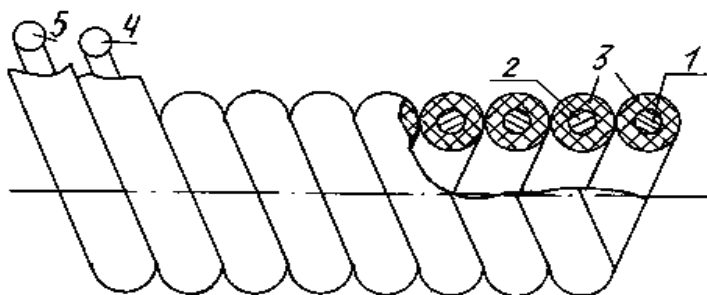


Рис. 1. Первое конструктивное исполнение емкостного сорбционного датчика влажности газа:

1 – первая обкладка; 2 – вторая обкладка; 3 – шелковая изоляция; 4 – клемма первой обкладки; 5 – клемма второй обкладки

При расчете были заданы такие основные параметры: диаметр одножильной проволоки – 2мм, толщина сорбирующей изоляции из шелка – 1,5мм, длина проволоки – 400мм.

Емкость датчика данного конструктивного исполнения определяют по формуле [3].

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n \cdot (g_r + g_a), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\varepsilon_n$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора;

$g_r$  – пространственная характеристика поля основного зазора;

$g_a$  – пространственная характеристика элемента внешнего поля.

Пространственная характеристика поля основного зазора показана на рис. 2. Она имеет вид параллелепипеда без двух полуцилиндров и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$g_r = \frac{\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{h}{d} + \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 - 1}\right)} = \frac{3,14 \cdot 0,4}{\ln\left(\frac{0,005}{0,002} + \sqrt{\left(\frac{0,005}{0,002}\right)^2 - 1}\right)} = 0,8m, \quad (2)$$

где  $l$  – длина электрода;

$h$  – высота зазора,  $h = 5$  мм;

$d$  – диаметр электрода.

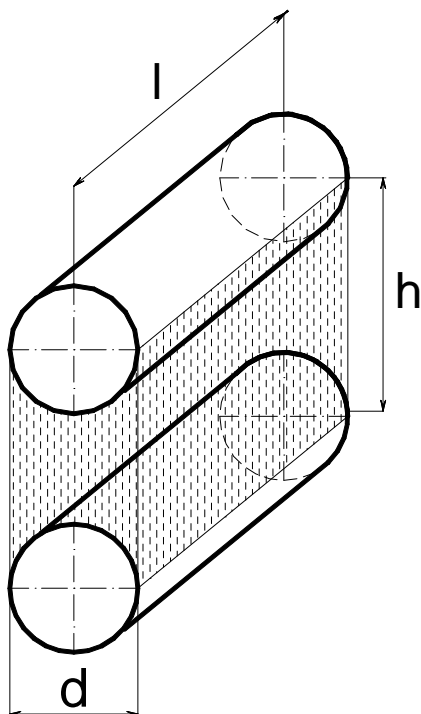


Рис. 2. Форма зазора между электродами датчика – параллелепипед без двух полуцилиндров

Диэлектрическую проницаемость среды шелк – воздух - вода между обкладками конденсатора находим из выражения Лихтенеккера [4]:

$$\lg \varepsilon_{cm} = \beta_{ш} \lg \varepsilon_{ш} + \beta_{вз} \lg \varepsilon_{вз}, \quad (3)$$

где  $\beta_{ш}$  – объемная концентрация шелка;  
 $\varepsilon_{ш}$  – диэлектрическая проницаемость шелка;  
 $\beta_{вз}$  – объемная концентрация воздуха;  
 $\varepsilon_{вз}$  – диэлектрическая проницаемость воздуха.

Диэлектрическую проницаемость шелка при максимальной влажности газа определяем по формуле Винера.

$$\varepsilon_{вш} = \varepsilon_{ш} \left( 1 + \frac{3 \cdot W}{\frac{\varepsilon_в + 2 \cdot \varepsilon_{ш}}{\varepsilon_в - \varepsilon_{ш}} - W} \right) = 4 \cdot \left( 1 + \frac{3 \cdot 0,3}{\frac{80,1 + 2 \cdot 4}{80,1 - 4} - 0,3} \right) = 8,2, \quad (4)$$

где  $W$  – влажность шелка, максимальное количество влаги, которую может впитать шелк, равно 30%;  
 $\varepsilon_в$  – диэлектрическая проницаемость воды при 20°C.

Находим диэлектрическую проницаемость в межэлектродном пространстве при нулевой влажности газа:

$$\varepsilon_{cm} = 10^{\beta_{ш} \cdot \lg \varepsilon_{ш} + \beta_{вз} \cdot \lg \varepsilon_{вз}} = 10^{0,75 \cdot \lg 4 + 0,25 \cdot \lg 1} = 2,82. \quad (5)$$

При 100%-ной влажности:

$$\varepsilon_{cm} = 10^{\beta_{вш} \cdot \lg \varepsilon_{вш} + \beta_{вз} \cdot \lg \varepsilon_{вз}} = 10^{0,75 \cdot \lg 8,2 + 0,25 \cdot \lg 1} = 4,85. \quad (6)$$

Емкость датчика при нулевой влажности газа:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cm} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,82 \cdot 0,8 = 19,96 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Емкость датчика при 100%-ной влажности газа:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{cm} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,85 \cdot 0,8 = 34,34 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Чувствительность датчика:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta W} = \frac{14,38}{100} = 0,1438 n\Phi / \%. \quad (7)$$

Вторая конструкция емкостного сорбционного датчика влажности газа показана на рис.3 [2].

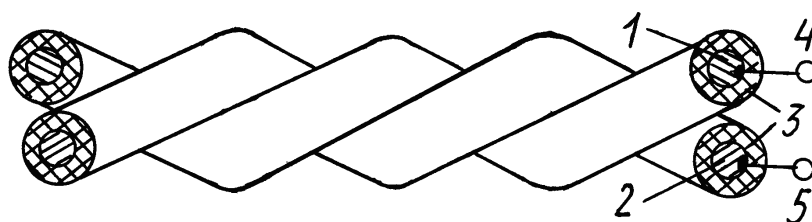


Рис. 3. Второе конструктивное исполнение емкостного сорбционного датчика влажности газа:

1 – первая обкладка; 2 – вторая обкладка; 3 – шелковая изоляция; 4 – клемма первой обкладки; 5 – клемма второй обкладки

Пространственная характеристика поля основного зазора имеет вид параллелепипеда без двух полуцилиндров и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$g_r = 0,9 \cdot \frac{\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{h}{d} + \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 - 1}\right)} = 0,9 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4}{\ln\left(\frac{0,005}{0,002} + \sqrt{\left(\frac{0,005}{0,002}\right)^2 - 1}\right)} = 0,72m,$$

где 0,9 – коэффициент соприкосновения электродов.

Диэлектрическая проницаемость среды шелк – воздух – вода будет такой же, как и в первом случае.

Определяем емкость датчика при нулевой влажности газа.

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,82 \cdot 0,72 = 17,97 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Емкость датчика при 100%-ной влажности газа:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,85 \cdot 0,72 = 30,9 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Чувствительность датчика:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta W} = \frac{12,93}{100} = 0,1293n\Phi / \%.$$

Третья конструкция емкостного сорбционного датчика влажности газа показана на рис.4 [2]. В данном конструктивном исполнении все размеры остались прежними, кроме зазора между электродами  $h$ , который равен 2,5мм.

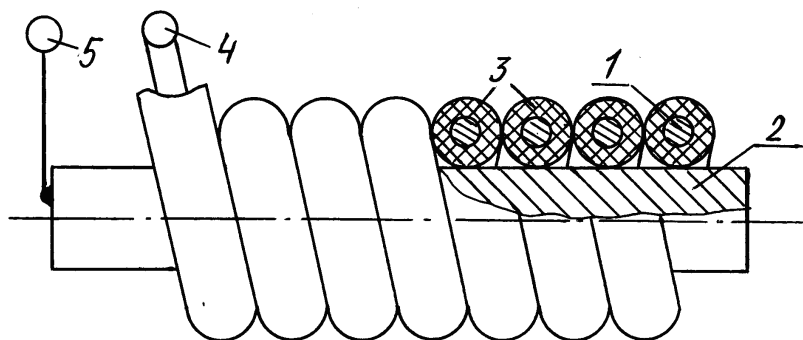


Рис. 4. Третье конструктивное исполнение емкостного сорбционного датчика влажности газа:

1 – первая обкладка; 2 – вторая обкладка; 3 – шелковая изоляция; 4 – клемма первой обкладки; 5 – клемма второй обкладки

Пространственная характеристика поля основного зазора показана на рис.5. Она имеет вид параллелепипеда без полуцилиндра и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$g_r = \frac{2\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d}\right)^2 - 1}\right)} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{\ln\left(\frac{2 \cdot 0,0025}{0,002} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 0,0025}{0,002}\right)^2 - 1}\right)} = 1,6m. \quad (8)$$

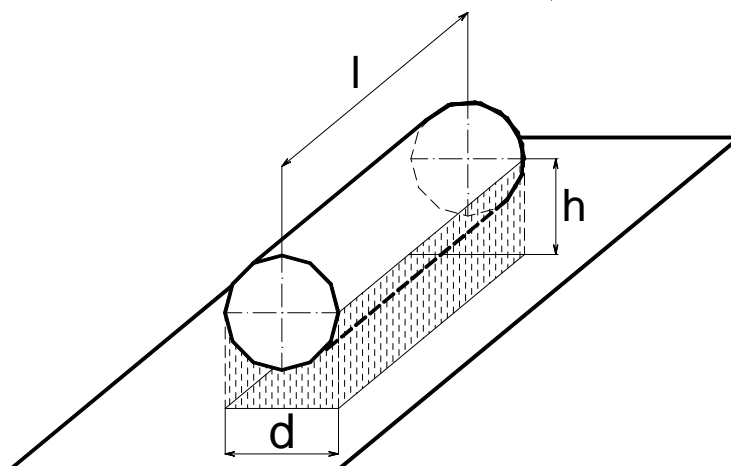


Рис. 5. Форма зазора между электродами датчика – параллелепипед без полуцилиндра

Находим емкость датчика при нулевой влажности газа.

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,82 \cdot 1,6 = 39,93 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Емкость датчика при 100%-ной влажности:

$$C_{100} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,85 \cdot 1,6 = 68,68 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Находим чувствительность датчика.

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta W} = \frac{28,75}{100} = 0,2875n\Phi / \%.$$

Все три конструктивных исполнения прототипа отличаются простотой, компактностью, дешевизной производства, но также имеют низкую начальную емкость и чувствительность.

Разработанный сорбционно-емкостный датчик влажности газов (рис.6) построен на том же принципе, что и прототип, и отличается тем, что вторая обкладка в виде металлического стержня имеет дополнительные прямоугольные стенки, в которые укладывается проволока с изоляцией. Это позволяет втрое увеличить значение пространственной характеристики поля основного зазора и, следовательно, увеличить начальную емкость датчика.

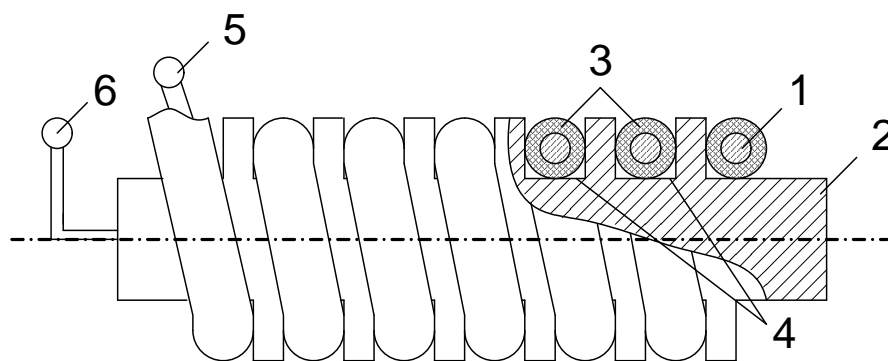


Рис. 6. Сорбционно-емкостный датчик влажности газов:

1 – первая обкладка; 2 – вторая обкладка; 3 – шелковая изоляция; 4 – пазы прямоугольной формы; 5 – клемма первой обкладки; 6 – клемма второй обкладки

Принцип работы датчика следующий. Контролируемый газ во время движения проникает между обкладками в микропоры диэлектрического сорбента из шелка. При изменении влажности газа изменяется равновесная влажность шелка, а следовательно, и его диэлектрическая проницаемость. Это вызывает пропорциональное изменение емкости датчика.

Пространственная характеристика поля основного зазора имеет вид параллелепипеда без полуцилиндра:

$$g_r = 3 \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d}\right)^2 - 1}\right)} = 3 \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{\ln\left(\frac{2 \cdot 0,0025}{0,002} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 0,0025}{0,002}\right)^2 - 1}\right)} = 4,8m.$$

Емкость датчика при нулевой влажности газа:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,82 \cdot 4,8 = 119,79 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Емкость датчика при 100%-ной влажности газа:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{см} \cdot g = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,85 \cdot 4,8 = 206,03 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Находим чувствительность датчика.

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta W} = \frac{86,24}{100} = 0,8624n\Phi / \%$$

## 5. Выводы и перспективы

В статье представлен сорбционный датчик измерения влажности емкостного типа и его сравнение с прототипом. Датчик разработан для системы автоматического впрыска воды в зону горения в котельной установке. Основная область применения – энергетическая и газовая отрасли.

Начальную емкость и чувствительность удалось повысить втрое благодаря расширению пространственной характеристики основного поля зазора путем добавления прямоугольных перегородок во вторую обкладку.

### Список литературы

1. Пат. 55411 Україна, МПК<sup>7</sup> G01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості / Заболотний О.В., Суходрус М.А.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». - № 201007646; заявл. 18.06.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23. – 2 с.: іл.

2. Заявка на изобретение Российской Федерации, МПК G01 N 27/22. Емкостной сорбционный датчик влажности газов / И.Г. Минаев, А.В. Вострухин (Российская Федерация). - №94030042; заявл. 09.08.1994; опубл. 20.06.1996, Бюл. №25. – 4 с.

3. Бухгольц, В.П. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / В.П. Бухгольц, Э.Г. Тисевич. - М.: Энергия, 1972.– 79 с.

4. Заболотний, О.В. Методи та засоби вимірювання фізико-хімічних величин. Контроль якості твердих і рідинних речовин / О.В. Заболотний, О.В. Світличний. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2008. – 80 с.

**Рецензент:** д.т.н., проф., зав. каф А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 14.11.11

## Сорбційно-ємнісний датчик вологості газів

Запропоновано нову конструкцію первинного вимірювального перетворювача вологості газів, отриману шляхом удосконалення готового перетворювача, конструкція якого має три варіанти виконання. Новизна полягає у доданні до другої обкладки пазів прямокутної форми, що дозволяє суттєво збільшити значення просторової характеристики. Запропоноване технічне рішення дозволило забезпечити більш високу чутливість первинного перетворювача.

**Ключові слова:** первинний перетворювач, вологість газу, шовкова ізоляція.

## Sorption capacitive sensor of the gas humidity

New design of the primary measuring converter of the gas humidity, which was obtained by improving the final converter, whose design has three variants, is offered. Novelty consist in adding a rectangular shape partitions, that allows significantly increase value of spatial characteristic. Described technical solution made it possible to provide much more high sensitivity of the primary converter.

**Keywords:** primary converter, moisture of the gas, silk insulation.