

И. И. Билинский, д. т. н., доц.; В. В. Онушко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗАТОРА ВЛАЖНОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Предложена математическая модель двухканального анализатора влажности газа, а также методика определения удельных молярных показателей поглощения природного сухого газа и водного пара, проведены экспериментальные исследования, выполнена проверка полученных значений относительной влажности.

Ключевые слова: относительная влажность, водный пар, сухой газ, длина волны, давление, температура, показатель поглощения, коэффициент пропускания, удельный молярный показатель поглощения, плотность.

Введение

Измерение и контроль влажности газовых сред остается актуальной задачей как современной науки, так и ее различных применений в народном хозяйстве и играет значительную роль при обеспечении качественных характеристик высокотехнологических процессов. При анализе влажности технологических газов наиболее информативная величина, характеризующая непосредственно количество воды в заданном объеме, является абсолютной влажностью, или относительной влажностью, что напрямую определяет потребительские свойства газов.

Контроль влажности можно разделить на три большие группы в соответствии с технологическим процессом, а именно: в процессах осушки газа на месторождениях; на газоперерабатывающих заводах; в коммерческом учете газа.

Среди анализаторов, используемых для лабораторного анализа влажности газа, лишь считанные единицы способны работать на потоке. Наиболее перспективными считаются информационно-измерительные системы конденсационного типа, реализующие прямой метод измерения температуры точки росы. В этом методе для достоверных измерений устанавливается равновесие по воде в рассматриваемом газе и на чувствительном элементе анализатора. Поэтому измерения, как правило, являются длительными по времени. Другие существующие методы измерения имеют такой же недостаток. Кроме того, примеси, содержащиеся в природном газе, такие как: метанол, растворяются в воде, и температура точки росы раствора может сильно отличаться от ее значения для чистой воды. Если в многокомпонентной среде (а именно такой средой является природный газ) температура конденсации какого-либо компонента выше точки конденсации паров воды, то анализатор может принять эту температуру за действительную [1 – 5].

На основе вышеупомянутого анализатор влажности должен удовлетворять следующие основные требования:

- быстрый отклик во избежание перекачки большого объема некондиционного продукта;
- отсутствие воздействия агрессивных примесей, а также искажения результатов измерения газа от влияния спиртовых соединений;
- низкая погрешность и высокая воспроизводимость результатов измерения;
- встроенные средства проверки подлинности показаний прибора без демонтажа полевого блока и остановки процесса, позволяющие быстро устранить разногласия между поставщиком и потребителем в спорных ситуациях.

Последние годы наблюдается прогресс в создании инфракрасных (ИК) свето- и фотодиодов, пригодных для применения в спектральных анализаторах влажности газа. Такие анализаторы удовлетворяют выше приведенным требованиям и наиболее полно реализуют

преимущества бесконтактного метода. Использование инфракрасного диапазона для измерения влажности газа является оправданным при условии регистрации его давления и температуры.

Целью работы является разработка математической модели инфракрасного анализатора влажности газа, который обеспечивает выше приведенные требования.

Материалы и результаты исследований

В основе метода абсорбционной спектроскопии лежит явление избирательного поглощения излучения многоатомными молекулами при его прохождении через среду. Вследствие поглощения происходит ослабление светового потока, которое описывается законом Бугера – Ламберта – Бера

$$I(\nu) = I_0 e^{-K(\nu)Cd}, \quad (1)$$

где $K(\nu)$ – показатель поглощения, функция частоты ν ; C – концентрация контролируемого вещества; d – толщина слоя газа, через который проходит пучок интенсивности света $I(\nu)$.

Относительную влажность газа с учетом стандартных условиях давления $P_{(c)}$ и температуры $T_{(c)}$, а также рабочих условий давления P и температуры T , которая приводится в работе [6], определяем

$$\phi = \frac{\left(\mu_{c.z.} P_{(c)} T Z \cdot \ln \frac{I_0(\nu)}{I(\nu)} - d K^{c.z.}(\nu) T_{(c)} P \rho_{c.z.(c)} \right) \mu_{в.п.}}{\left(\mu_{c.z.} K^{в.п.}(\nu) \rho_{в.п.(c)} - \mu_{в.п.} K^{c.z.}(\nu) \rho_{c.z.(c)} \right) d T_{(c)} P_{в.п. \max}}, \quad (2)$$

где $K^{c.z.}(\nu)$ и $K^{в.п.}(\nu)$ – удельные молярные показатели поглощения природного сухого газа и водного пара на частоте ν ; $\mu_{c.z.}$ и $\mu_{в.п.}$ – молекулярные массы природного сухого газа и водного пара соответственно; $\rho_{c.z.(c)}$ и $\rho_{в.п.(c)}$ – плотность сухой части и плотность водного пара при стандартных условиях соответственно.

Природный газ – это газовая смесь, компонентами которой, кроме смеси углеводородов ($C_n H_{2n+2}$) и водного пара, может быть азот, двуокись углерода, сероводород, кислород, водород, аргон, гелий и т. д. Это значит, что плотность смеси газа и соответственно его молекулярная масса при стандартных условиях может изменяться, поэтому необходимо выполнять дополнительные измерения. Такие измерения можно проводить как прямыми методами (измерение плотности в реальном времени), так и косвенными, опосредованными (путем определения плотности как функции давления и температуры). Все это усложняет процесс измерения относительной влажности [7].

Для устранения вышеуказанных недостатков в работе предложен анализатор влажности, который содержит два равноценных канала: первый – измерительный, настроенный на рабочую длину волны

(ν_1); второй – на опорную (ν_2).

Выходная интенсивность измерительного канала согласно [6] определяется

$$I(\nu_1) = I_0(\nu_1) e^{-d \left(K^{в.п.}(\nu_1) C_{в.п.} + K^{c.z.}(\nu_1) C_{c.z.} \right)} = I_0 e^{-d \left(K^{в.п.}(\nu_1) \frac{\rho_{в.п.}}{\mu_{в.п.}} + K^{c.z.}(\nu_1) \frac{\rho_{c.z.}}{\mu_{c.z.}} \right)}. \quad (3)$$

Выходная интенсивность опорного канала определяется

$$I(\nu_2) = I_0(\nu_2) e^{-d \left(K^{в.п.}(\nu_2) C_{в.п.} + K^{c.z.}(\nu_2) C_{c.z.} \right)} = I_0 e^{-d \left(K^{в.п.}(\nu_2) \frac{\rho_{в.п.}}{\mu_{в.п.}} + K^{c.z.}(\nu_2) \frac{\rho_{c.z.}}{\mu_{c.z.}} \right)}, \quad (4)$$

где $K(v_1)^{c.z.}$ и $K(v_1)^{в.п.}$, $K(v_2)^{c.z.}$ и $K(v_2)^{в.п.}$ – удельные молярные показатели поглощения природного сухого газа и водного пара измерительного и опорного канала соответственно;

$\mu_{c.z.}$ и $\mu_{в.п.}$ – молекулярные массы природного сухого газа и водного пара соответственно.

Плотность реального природного газа с учетом фактора сжимаемости Z определяется по формуле

$$\phi = \frac{\mu_{в.п.} P_c T Z \cdot \left(K(v_1)^{c.z.} \ln \frac{I(v_2)}{I_0(v_2)} - K(v_2)^{c.z.} \ln \frac{I(v_1)}{I_0(v_1)} \right)}{dT_c P_{в.п.(max)} \left(K(v_1)^{c.z.} K(v_2)^{в.п.} - K(v_1)^{в.п.} K(v_2)^{c.z.} \right) \rho_{в.п.(c)}}. \quad (5)$$

Формула преобразования (5) позволяет определить относительную влажность газа, не учитывая ни плотность смеси газов, ни его молекулярную массу, ни давление, что существенно упрощает процесс измерения.

На рис. 1 приведена структурная схема двухканального анализатора влажности. Сенсор состоит из корпуса (1), оптических схем ввода излучения измерительного и опорного каналов (2), (7), светодиодов (3) и (6), излучающих монохроматический свет соответствующей частоты, оптических схем вывода излучения измерительного и опорного каналов (4), (9) и фотоприемников (5), (8).

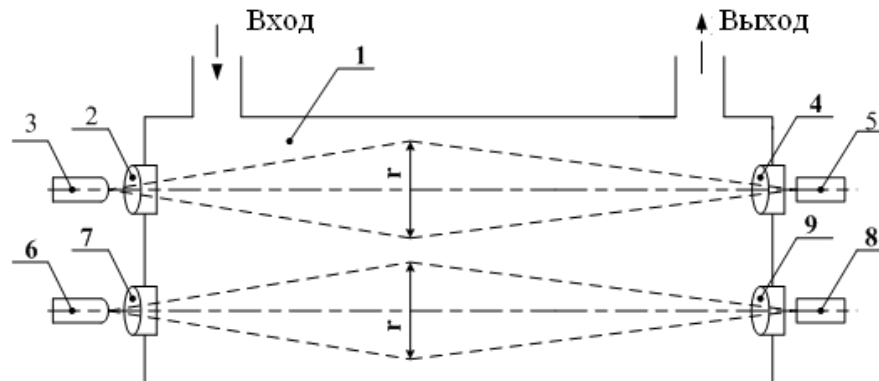


Рис. 1. Оптическая схема двухканального анализатора влажности газа

Корпус анализатора представляет собой трубу, диаметр которой обусловлен габаритными размерами оптической системы, обеспечивающей оптимальные параметры светового потока.

Для выбора габаритных размеров сенсора, а также параметров оптической системы, которые бы обеспечили необходимую чувствительность и точность измерения влажности газа, необходимо в лабораторных условиях провести экспериментальные исследования. В связи с этим в работе предложена методика определения удельных молярных показателей поглощения природного сухого газа и водного пара и разработана установка для исследования характеристик анализатора влажности газа, структурная схема которой приведена на рис. 2.

Схема установки содержит лампу накаливания (1), оптическую систему формирования параллельного светового потока (2), кювету (3), в которую помещаются предметные стеклянные пластины (4), (6), между которыми находится исследуемая жидкость (5), монохроматический фильтр (7), фотоприемное устройство (8), усилитель сигнала (9), индикатор (10).

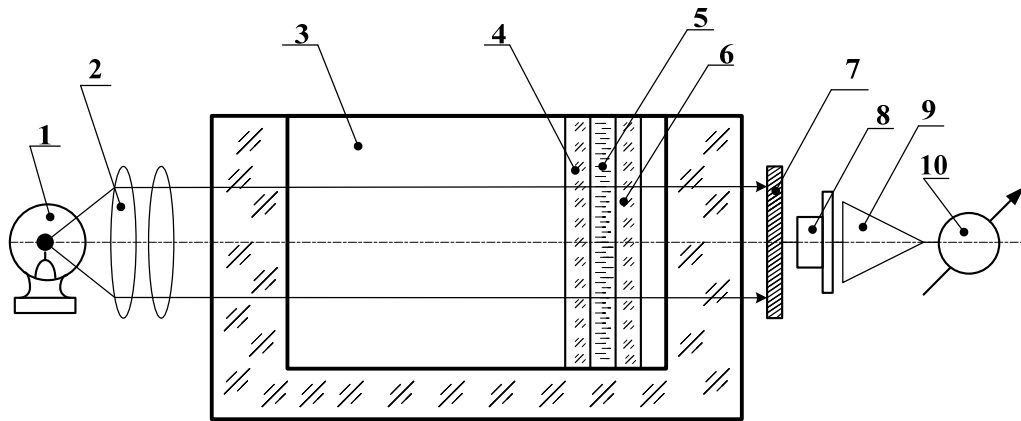


Рис 2. Структурная схема установки для исследования характеристик анализатора влажности газа

Световой поток от лампы накаливания (1) с помощью оптической схемы (2) направляется на систему стеклянных пластин (4), (6), проходя слой жидкости (5), за счет которой происходит ослабление потока. Далее ослабленный световой луч проходит монохроматический фильтр (7), который выделяет из потока спектральную составляющую с мощной линией поглощения жидкости. Сформированный на выходе фильтра луч попадает на фотоприемник (8). Световой поток, являющийся функцией параметров затухания влажного газа, превращается в электрический сигнал и подается на вторичный измерительный преобразователь. Функция преобразования этого процесса описывается как

$$U = \Phi_{\text{св}} \tau_{\text{осв}} \tau_{\text{к}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{сф}} \tau_{\text{сф}} SK_{\text{ПП}} , \quad (6)$$

где $\Phi_{\text{св}}$ – световой поток излучателя; $\tau_{\text{осв}}, \tau_{\text{сф}}$ – коэффициенты пропускания оптической системы анализатора газа и фотоприемного устройства соответственно; $\tau_{\text{к}}$ – коэффициент пропускания кюветы и стеклянных пластин; $\tau_{\text{м}}$ – коэффициент пропускания жидкости; $\tau_{\text{сф}}$ – коэффициент пропускания фильтра выделения спектрального интервала; S – интегральная чувствительность фотоприемного устройства; $K_{\text{ПП}}$ – коэффициент передачи предварительного усилителя.

Для проведения исследований использовалась дистиллированная вода и уайт-спирит как углеводородное соединение. Вода и уайт-спирит помещались между предметными стеклянными пластинами. Толщина слоя определялась с помощью микроскопа и составляла 0,01 мм. Диаметр кристалла фотоприемника был известен и составлял 0,3 мм. Это позволило вычислить объем жидкости, находящейся между пластинами и соответственно их массы, которые составили $7,065 \cdot 10^{-7}$ г для воды и $5,581 \cdot 10^{-7}$ г для уайт-спирита. Использование набора стеклянных пластин позволило постепенно увеличивать массы исследуемых жидкостей. Такой подход позволил получить экспериментальные характеристики светопропускания воды и уайт-спирита при увеличении массы исследуемой жидкости, которую пронизывает световой луч, и определить коэффициенты пропускания воды и уайт-спирита. При этом коэффициент пропускания определялся как отношение интенсивности светового потока, прошедшего через кювету с жидкостью, к интенсивности светового потока, прошедшего через кювету без жидкости с учетом поглощения кюветы и оптронной системы

$$T(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \cdot 100\% .$$

Это означает, что определение $T(\nu)$ сводится к независимому последовательному

измерению величин $I_0(\nu)$ и $I(\nu)$. Полученные коэффициенты пропускания воды будут соответствовать коэффициентам пропускания водного пара $T(\nu)^{в.п.}$ в определенном объеме, а коэффициенты пропускания уайт-спирита – коэффициентам пропускания сухого природного газа $T(\nu)^{с.г.}$ в определенном объеме. При этом учтены потери на отражение от окон кюветы и стеклянных пластин, находящихся на пути монохроматического луча.

Исследования проводились в монохроматическом свете на длинах волн от 1 до 1,5 мкм, что позволило определить наибольшую и наименьшую чувствительность к воде. Установлено, что светодиод опорного канала должен работать на длине волны, соответствующей 1,33 мкм, а измерительного – на 1,45 мкм.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости коэффициента пропускания от массы жидкости, через которую проходит световой поток.

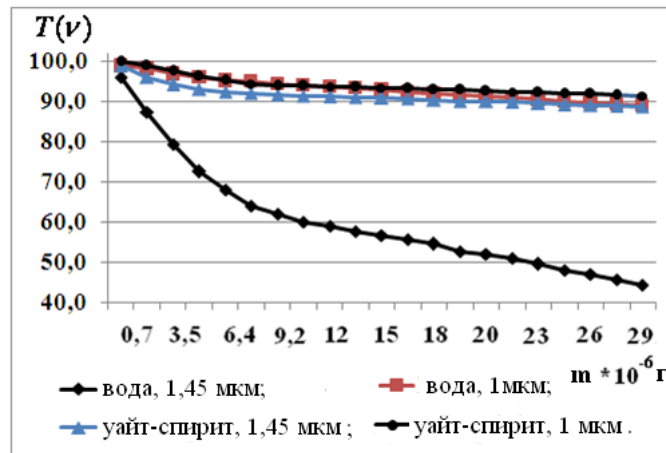


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента пропускания от массы жидкости, через которую проходит световой поток

Полученные экспериментально коэффициенты пропускания позволили определить удельные молярные показатели поглощения, которые на длине волны 1,45 мкм составляют для воды – $1710 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$, для уайт-спирита – $29 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$; на длине волны 1,33 мкм для воды – $18,1 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$, для уайт-спирита – $23,6 \frac{\text{л}}{\text{см} \cdot \text{моль}}$. При этом, исходя из допустимо возможных масс водного пара и газа, базовое расстояние прохождения светового луча анализатора составило 0,5 м.

На рис. 4 приведена характеристика относительной влажности газа, полученная на основе формулы 5.

Исследования показали, что влияние опорного канала на результаты измерения незначительны, но имеют место. Это позволило повысить точность измерения, поскольку двухканальная система, в отличие от одноканальной, не требует дополнительных измерений давления газа и его молекулярной массы. Кроме этого, использование дополнительного канала позволяет исключить влияние агрессивных примесей. Абсолютная погрешность относительной влажности составляет не более 0,5%.

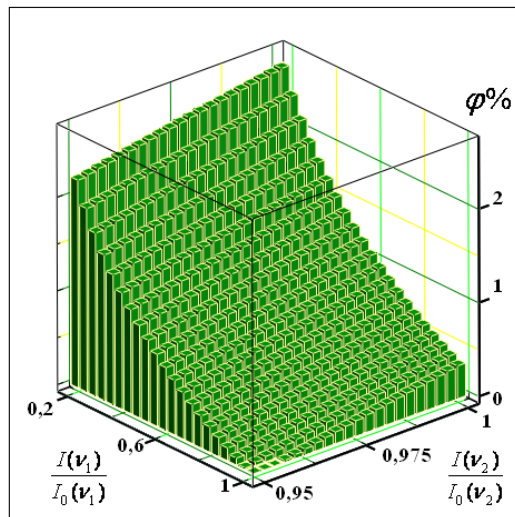


Рис. 4. Характеристика относительной влажности

Проверка полученных значений относительной влажности на основе (5) и данных концентраций водного пара согласно рис. 3 и рис. 4 выполнена относительно уравнения, которое использует значение температуры точки росы в [8, 9]. Максимальное отклонение рассчитанных значений относительной влажности от значений на основе зависимостей из [8, 9] не превышает 8%.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена математическая модель двухканального анализатора влажности газа, которая, в отличие от одноканальной, не требует дополнительных измерений давления газа и его молекулярной массы.
2. Предложена методика определения удельных молярных показателей поглощения природного сухого газа и водного пара, разработана установка для исследования характеристик анализатора влажности газа.
3. Проведены экспериментальные исследования по определению максимальной чувствительности в ближнем ИК диапазоне, выполнен выбор длины волны, которая составляет 1,45 мкм для измерительного канала и 1,33 мкм для опорного.
4. Выполнена проверка полученных значений относительной влажности согласно формуле (5) относительно уравнения для определения температуры точки росы в [8, 9] (максимальное отклонение не превышает 8%).
5. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование двухканальной системы даёт возможность улучшить метрологические характеристики инфракрасного анализатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селезнев С. В. Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа / С. В. Селезнев // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : Научно-технический сб. – 2005. – № 2. – С. 10 – 22.
2. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
3. Пеклер В. В. Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения / В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов // Датчики и системы. – 2006. – № 1. – С. 33 – 38.
4. Сайдов Г. В. Практическое руководство по абсорбционной молекулярной спектроскопии / Г. В. Сайдов, О. В. Свердлова. – Л.: ЛГУ, 1973. – 86 с.
5. Котяхов Ф. И. Физика нефтяного и газового коллектора / Ф. И. Котяхов. – М.: Недра, 1997. – 288 с.

6. Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білінський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 18 – 22.
7. Андріішин М. П. Вимірювання витрат та кількості газу: Довідник/ М. П. Андріішин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, А. А. Руднік, О. Є. Сердюк, С. А. Чеховський. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2004. – 160 с.
8. Лесовий Л. В. Визначення відносної вологості газу для вузлів обліку із застосуванням засобів вимірювання температури точки роси. / Л. В. Лесовий, Ф. Д. Матіко // Вісник національного університету «Львівська політехніка» 2009. – № 659. – С. 84 – 91.
9. ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги, 1984, 11 с.

Билинский Иосиф Иосифович – д. т. н., заведующий кафедрой электроники.
Винницкий национальный технический университет.

Онушко Василий Владимирович – заместитель начальника отдела ГП «Укрметртестстандарт».