

УДК 303.2: 53.082

DOI: 10.18503/2306-2053-2021-9-1-16-21

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Каландаров П.И., Мукумов З.М., Абдуллаев Х.Х., Авезов Н.Э.

Аннотация. В статье рассматривается принцип измерения влажности твердых и сыпучих материалов, а также анализ спектра электромагнитных колебаний используемые в пределах средне- и коротковолновой диапазоны (от 0,1 до 50 МГц) высоких частот. Обсуждается действия высокочастотных влагометрических систем, основанные на наличии зависимости между диэлектрической проницаемостью контролируемого материала и его влажностью. Отличительной особенностью исследования является контролируемость материала помещаемого в ёмкостном первичном преобразователь, при этом, параметром измерения является не диэлектрическая проницаемость, а ёмкость преобразователя. Описывается диэлькометрический метод и рекомендуются на их основе проектирование и синтеза диэлькометрического прибора контроля влажности, которые в настоящее время нами ведутся исследование в пищевой промышленности с помощью – концентратов, муки, чая, зерна, солода, в аграрной отрасли – влажность хлопка-сырца, семян хлопчатника, шелухи, шрота, жмыха, зерна и зернопродуктов, пшеницы, кукурузы, ячменя, и многих др. продуктов, полуфабрикатов и исходного сырья. Изучены частотные зависимости диэлектрической проницаемости что определяются частотными зависимостями действительной и мнимой частей электронной и ионной поляризации, а также метрологическая и информационная оптимизация измерительного прибора описан изменение выходного сигнала и их уравнение.

Ключевые слова: влажность, влагосодержание, измерение, метод, частота, прибор, преобразователь, ёмкость, диэлектрическая проницаемость.

Введение

Методы измерения влажности твердых и сыпучих материалов, основаны на преобразовании влажности в другую физическую величину с использованием современной измерительной техники.

Влага является одним из обязательных компонентов всех живых организмов на земле, а также большинства материалов, используемых человеком. От влажности зависят физические, химические, механические и технологические свойства значительной части неметаллических материалов.

Почти во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве, энергетике и строительстве применяются процессы сушки и увлажнения, предназначенные для изменения влажности материалов. Поэтому количественное определение влажности твердых материалов, жидкостей и газов необходимо почти во всех отраслях экономики, в научных исследованиях, связанных со многими областями знаний [1].

Для характеристики содержания влаги в твердых и сыпучих материалах применяются, как правило, две величины: влагосодержание U и влажность W , выражаемая в относительных единицах или в процентах.

Влагосодержание – отношение массы влаги (воды) M , содержащейся в материале, к массе абсолютно сухого материала M_0

$$U = \frac{M}{M_0}. \quad (1)$$

Влажность – отношение массы влаги M , содержащейся в материале, к массе влажного материала M_w , т.е.

$$W = \frac{M}{M_w} = \frac{M}{M_0} + M. \quad (2)$$

Вода в состав материала может попадать в результате:

- абсорбции на поверхности и в порах;
- гидратации полярных групп макромолекул;
- внедрения в состав решетки кристаллогидратов минеральной части.

Масса материала, которую получает потребитель – это рабочая масса материала. Если её высушивать при комнатной температуре, то после испарения внешней влаги, проба придет к воздушно-сыхому состоянию. Массу такого образца при размельчении до 0,2 мм называют аналитической массой материала. Однако в составе породы еще остается значительное количество влаги, которая удерживается капиллярными и сорбционными силами. Чтобы ее удалить, материал нагревают до 105 °С [2].

Часть воды, которая испарится при нагревании, есть общая влага рабочей массы материала. В результате остается сухая масса материала. Дальнейшее нагревание приводит к разрыву связей в кристаллогидратах и выделению химически связанной воды. Показатель общей влаги W_h рабочей массы материала равен отношению массы влаги, выделившейся при температуре обезвоживания, к массе анализируемого образца m_a и выражается формулой:

$$W_h = \frac{m_a - m_d}{m_a} 100, \quad (3)$$

где m_d – масса сухого материала, полученная при температуре обезвоживания.

Контроль и измерение влажности материала на узлах учета является обязательным, поскольку любое отклонение от согласованных поставщиком и потребителем спецификаций влечет серьезные штрафы. Поэтому приборы контроля влажности на узлах учета должны удовлетворять следующим требованиям [3]:

- быстрый отклик, требующийся для избегания производства некондиционного материала;
- низкая погрешность и воспроизводимость результатов измерений, чтобы гарантировать соблюдение требованиям спецификации товарного материала.

Материалы и методы

В технологическом процессе переработки зернистых материалов одним из основных факторов, влияющим на качественные и количественные показатели, является влажность. Изменение влажности на 0,1% от оптимального значения уменьшает выход порядка от 0,8 до 1,0%, что приводит к потерям дохода [4].

Анализируя проведенные нами исследования диэлькометрического метода и приборов основанные этим методом для различных свойств материалов аналогичной зерновой массы, обладают перед другими рядом существенных преимуществ и недостатков [5].

При исследовании диэлькометрического высокочастотного метода важной является задача построения математической модели высокочастотного прибора, позволяющего получить достаточно точное математическое описание функции преобразования и функций влияния основных влияющих величин.

Рассматриваемые диэлькометрические влагомеры твердых и сыпучих материалов в настоящее время получили широкое распространение практически во всех отраслях науки и техники, где с их помощью измеряется влажность в пище – концентратов, муки, чая, зерна, солода, в аграрной отрасли – влажность хлопка-сырца, семян хлопчатника, шелухи, шрота, жмыха, пшеницы, кукурузы, ячменя, и многих др. продуктов, полуфабрикатов и исходного сырья.

Для проектирование приборов контроля влажности крайне важным является вопрос выбора измерительного преобразователя, его принципов действия, и конструкции. Изучение влажностных и частотно-влажностных характеристик дает возможность определить функции преобразования схемы диэлькометрического прибора контроля влажности, т.е. преобразования «влажность-диэлектрические свойства» материалов в исследуемом диапазоне частот, выбор оптимальной рабочей частоты для проектирования и разработки измерительного преобразования [6].

Результаты

Комплексная диэлектрическая проницаемость неполярного твердого диэлектрика определяется комплексными поляризуемостями α_1 и α_i [7]. Соответственно и частотная зависимость диэлектрической проницаемости будет определяться частотными зависимостями дей-

ствительной и мнимой частей электронной и ионной поляризации. Отсюда следует, что действительная и мнимая части

$$\tilde{\varepsilon}^* = \varepsilon' - \gamma\varepsilon'' \quad (4)$$

являются функциями приложенного поля и определяются с помощью $\tilde{\alpha}_1(\omega)$ и $\tilde{\alpha}_i(\omega)$: тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$; комплексная проводимость $\sigma^* = \sigma' + \gamma\sigma''$.

Зависимости между этими величинами имеют вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon; \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}; tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'}; \varepsilon^* = \varepsilon(1 - jtg\delta), \quad (5)$$

где ω – угловая частота, ε – диэлектрическая проницаемость, ε' – вещественная, ε'' – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости, ε^* – комплексная диэлектрическая проницаемость, $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, σ – удельная проводимость.

Зная одну из указанных пар параметров, можно, вычислить любую другую пару. Также используются такие параметры, как добротность контура $Q = 1/tg\delta$ или активная σ' и реактивная σ'' составляющие комплексной проводимости σ^* .

Практическое значение этих результатов зависит от рабочей области частот. В соответствии с $\tilde{\alpha}_1(\omega)$ и $\tilde{\alpha}_i(\omega)$ остаются равными действительным значениям поляризуемости до тех пор, пока частоты, при которых проводятся измерения, лежат в области ниже инфракрасных частот. Поэтому для исследуемых материалов $\tilde{\varepsilon}$ вплоть до микроволновых частот равна ε' и поведение ε^* такое же, как в случае статического поля. Измерение влажности диэлектрическим методом основано на различии значений диэлектрической проницаемости твердой основы, воздуха и воды [8].

Их действие основано на сильной зависимости диэлектрической проницаемости веществ ε от содержания в них влаги; это обусловлено аномально большой ε воды (81 при 20 °C). Измерение ε в диапазоне средних частот тока (0,1-30 МГц) сводится к определению ёмкости C конденсатора, между обкладками (электродами) которого помещено исследуемое вещество ($C = C_0 \cdot \varepsilon$, где C_0 – ёмкость незаполненного конденсатора). В диапазоне сверхвысоких частот (30 МГц и выше) измеряют частоту колебаний объемного резонатора, в котором находится влажное вещество [9].

Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость воды является величиной постоянной и близка к 81 ($\varepsilon_b \approx 81$), диэлектрическая проницаемость большинства сухих веществ лежит в пределах от 2 до 10, например, ε_p песка колеблется между 3 и 4. Это означает, что существует большая измеряемая разница между диэлектрической проницаемостью воды (80) и материалов (1-10). Эту разницу можно измерить и сопоставить с определенным значением влажности. Тогда значение влажности будет выдаваться как типовой сигнал (0 – 10 V постоянного тока или 0 – 20 mA), сопоставляемый с определенным весовым содержанием влаги в исследуемом материале. Другими словами, чем больше в материале воды или другой влаги, тем ближе значение ε к 80. Тогда даже незначительное изменение влажности вещества вызывает изменение его диэлектрических характеристик – диэлектрической проницаемости, а также тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Приращение диэлектрической проницаемости в зависимости от влагосодержания материала может быть описано в общем случае зависимостью следующего вида:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_b f(\xi, n, i, r, k), \quad (6)$$

где ε_b – диэлектрическая проницаемость свободной воды; ξ – фактор, определяемый распределением и формой включения влаги; n – отношение объемов свободной и связанной влаги; r – объемная концентрация воды в материале; i – отношение диэлектрической проницаемо-

сти связанной и свободной воды; k – отношение диэлектрической проницаемости сухого материала и влаги.

В качестве первичных измерительных преобразователей в диэлькометрических влагомерах используются плоские или цилиндрические конденсаторы (электрические ёмкости), в электрическое поле которых вводится измеряемый материал [10].

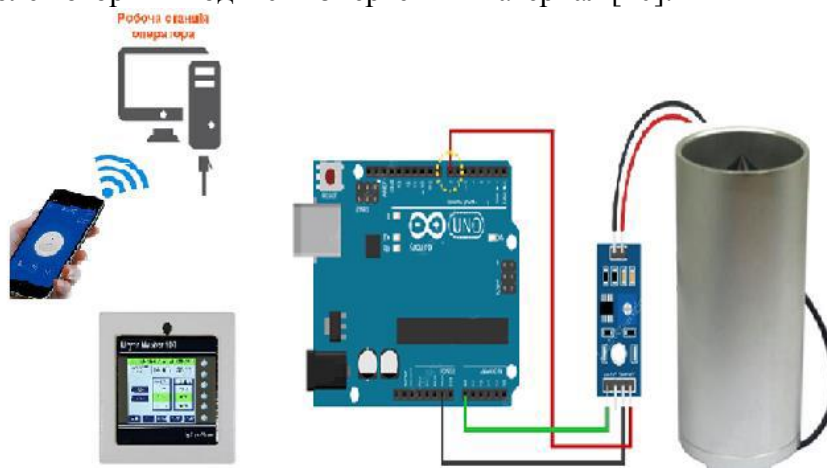


Рис. 1. Устройство для контроля влажности зерна в режиме реального времени с использованием ёмкостного первичного преобразователя

Примером параметрического ёмкостного первичного преобразователя может служить переменная емкость, включенная в контур генератора (рис. 1) [11]. Здесь при изменении угла поворота оси ротора изменяется емкость датчика и меняется частота генератора, являющаяся выходной величиной.

Ёмкость плоского конденсатора можно рассматривать как

$$C = \varepsilon_a \left(\frac{S}{a} \right), \quad (7)$$

цилиндрического – как

$$C = \varepsilon_a \left[\frac{2\pi L}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right], \quad (8)$$

где ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость межэлектродного пространства, $\Phi/м$; S – площадь электродов, $м^2$; a – расстояние между электродами, $м$; L – длина цилиндрических электродов, $м$; R_2 – радиус внутреннего электрода, $м$; R_1 – радиус внешнего электрода, $м$.

Из формул (7) и (8) видно, что при постоянных геометрических размерах справедлива следующая функциональная зависимость:

$$C = (\varepsilon). \quad (9)$$

Заключение

Данная статья направлена на выявление и раскрытие принципов при проектировании аналогичных экспрессных приборов контроля влажности для рассматриваемых материалов. Ведущим методом к исследованию данной проблемы является выбор метода на основе которого необходимо будет синтезировать прибор позволяющий комплексно измерять влажность материала на всех этапах их контроля по влажности [12, 13]. В статье представленные материалы позволят вести инженерный расчет и выбор рабочей частоты и ёмкости измерительных параметров первичного преобразователя ёмкостного типа и синтезировать экспрессный прибор контроля влажности для рассматриваемых материалов [14]. Материалы статьи представляют практическую ценность для пищевых, хлопкоочистительных, зерноперерабатывающих мукомольных производств, где влажность зерна является одним из важнейших техно-

логических параметров, что требуется вести контроль на всех этапах производства материалов [15].

Список использованных источников

1. Крымский, К.И. Обзор современных методов и технических средств измерения влажности торфа / К.И. Крымский, О.М. Большунова // Записки горного института. – 2012. – Т.196. – С. 248-251.
2. Каландаров, П.И. Термогравиметрический метод измерения влажности: оценка точности и эффективность применения в агропромышленном комплексе / П.И. Каландаров // Метрология. – 2021. – №2. – С. 44-62. <https://doi.org/10.32446/0132-4713.2021-2-44-62>.
3. Машарипов, Ш.М. Анализ современных методов и технических средств измерения влажности хлопковых материалов / Ш.М. Машарипов // Приборы. – 2016. – №4. – С.31-37.
4. Гайский, П.В. Практические аспекты реализации кондуктивного датчика электропроводности жидкости / П.В. Гайский // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – Вып. 2(40). – С. 72-81. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-2-72-81.
5. Kalandarov, P.I. Physicochemical measurements: measurement of the moisture content of brown coal from the Angrensk deposit and problems of metrological assurance / P.I. Kalandarov, B.P. Iskandarov // Measurement Techniques. – 2012. – Т. 55. – № 7. – С. 845-848.
6. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Кричевский Е.С. [и др.] – М.: «Энергия», 1980. – 231 с.
7. Kraszewski, A. Determination of the strength of water suspensions using a microwave bridge technique. G. of microwave Power, 1984. – P. 361-373.
8. Искандаров, Б.П. Анализ воздействия влияющих факторов на результаты измерений влажности материала на высоких частотах / Б.П. Искандаров, П.И. Каландаров // Измерительная техника. – 2013. – № 7. – С. 64-66.
9. Исмагуллаев, П.Р. Сверхвысокочастотные измерения влажности и проблемы метрологического обеспечения / П.Р. Исмагуллаев, П.И. Каландаров // Приборы. – 2011. – № 7 (133). – С. 40-44.
10. Каландаров, П.И. Особенности автоматизированного измерения влажности зерновых культур в полевых условиях / П.И. Каландаров, А.М. Макаров, Г.М. Аралов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (248). – С. 60-63. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-1-248-60-63>.
11. Каландаров, П.И. Научные основы влагометрии : монография / П.И. Каландаров, О.С. Логунова, С.М. Андреев. – Ташкент : Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, 2021. – 175 с.
12. Kalandarov, P.I. Anaiysis of hydrothermal features of grain and instrument desulphurization of moisture control / P.I. Kalandarov, Z.M. Mukimov, O.S. Logunova // Technical Science and Innovation. – 2020. – No 1. – P. 117-123.
13. Iskandarov, B.P. An analysis of the effect of interfering factors on the results of measurements of the moisture content of a material at high frequencies / B.P. Iskandarov, P.I. Kalandarov Measurement Techniques. – 2013. – Т. 56. – № 7. – P. 827-830.
14. Искандаров, Б.П. Автоматический контроль влажности твёрдых сыпучих материалов в технологическом потоке / Б.П. Искандаров, П.И. Каландаров // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 303-308.
15. Каландаров, П.И. Измерения влажности в технологическом процессе с коррекцией по толщине слоя материала / П.И. Каландаров, Б. Искандаров // Приборы. – 2012. – № 7 (145). – С. 19-22.

Материал поступил в редакцию: 17.09.2021

Материал принят к публикации: 29.10.2021

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MEASUREMENT OF HUMIDITY OF SOLID AND BULK MATERIALS

Kalandarov P.I., Mukimov Z.M., Abdullaev H.H., Avezov N.E.

Abstract. The article describes the principle of measuring the humidity of solid and bulk materials, as well as the analysis of the spectrum of electromagnetic vibrations used within the medium - and short-wave ranges (from 0.1 to 50 MHz) of high frequencies for measuring humidity. The actions of high-frequency moisture-measuring systems based on the presence of a dependence between the dielectric permittivity of the controlled material and its humidity are discussed. A distinctive feature of the study is that the controlled material is placed in a capacitive primary converter, while the measurement parameter is not the permittivity, but the capacitance of the converter. We describe the dielkometric method and recommend on their basis the design and synthesis of a dielkometric humidity control device, which we are currently conducting research in the food industry with the help of concentrates, flour, tea, grain, malt, in the agricultural industry – the humidity of raw cotton, cotton seeds, husk, meal, cake, grain and grain products, wheat, corn, barley, and many other products, semi-finished products and raw materials. The frequency dependences of the permittivity are studied, which are determined by the frequency dependences of the real and imaginary parts of the electronic and ionic polarization, as well as metrological and information optimization of the measuring device, the change in the output signal and their equation are described.

Keywords: humidity, moisture content, measurement, method, frequency, device, converter, capacitance, permittivity.

References

1. Krymskij, K.I., Bol'shunova, O.M. (2012) *Zapiski gornogo institute*, 196: 248-251.
2. Kalandarov, P.I. (2021) *Metrologiya*, №2: 44-62.
3. Masharipov, S.H.M. (2016) *Pribory*, 4: 31-37.
4. Gajskij, P.V. (2020) *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2(40): 72-81.
5. Kalandarov, P.I., Iskandarov, B.P. (2012) *Measurement Techniques*, 7: 845-848.
6. Krichevskij E.S. [i dr.] (1980) *Teoriya i praktika ekspressnogo kontrolya vlazhnosti tverdyh i zhidkih materialov*, M.: 231.
7. Kraszewski, A. (1984) Determination of the strength of water suspensions using a microwave bridge technique. *G. of microwave Power*: 361-373.
8. Iskandarov, B.P., Kalandarov, P.I. (2013) *Izmeritel'naya tekhnika*, № 7: 64-66.
9. Ismatullaev, P.R., Kalandarov, P.I. (2011) *Pribory*, 7 (133): 40-44.
10. Kalandarov, P.I., Makarov, A.M., Aralov, G.M. (2021) *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1 (248): 60-63.
11. Kalandarov, P.I. Logunova, O.S., Andreev, S.M. (2021) *Nauchnye osnovy vlagometrii*, Tashkent : 175.
12. Kalandarov, P.I., Mukimov, Z.M., Logunova, O.S. (2020) *Technical Science and Innovation*, 1: 117-123.
13. Iskandarov, B.P., Kalandarov, P.I. (2013) *Measurement Techniques*, 7: 827-830.
14. Iskandarov, B.P., Kalandarov, P.I. (2012) *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 20: 303-308.
15. Kalandarov, P.I., Iskandarov, B.P. (2021) *Pribory*, 7 (145): 19-22.

ОБ АВТОРАХ:

Каландаров Палван Искандарович – доктор технических наук, профессор. Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Республика Узбекистан. E-mail: eest_uz@mail.ru.

Мукимов Зиевиддин Маъмурович – соискатель, Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Республика Узбекистан. E-mail: mukimov63@inbox.ru.

Абдуллаев Хусниддин Хусеин угли – аспирант. Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

E-mail: husniddin.abdullayev9395@gmail.com.

Авезов Нодирбек Эгамбердиевич – кандидат технических наук, заместитель декана Ташкентского университета информационных технологий Ургенчского филиала, г. Ургенч, Республика Узбекистан. E-mail: nodir.avezov777@gmail.com.

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Каландаров, П.И. Математическая и эмпирическая основа измерения влажности твердых и сыпучих материалов / П.И. Каландаров, З.М. Мукимов, Х.Х. Абдуллаев, Н.Э. Авезов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2021. – Т.9. – № 1. – С. 12-21. DOI: 10.18503/2306-2053-2021-9-1-16-21.

Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Abdullaev H. H. and Avezov N. E. (2021) Measurement of humidity of solid and bulk materials. *Software of systems in the industrial and social fields*, 9 (1): 16-21. DOI: 10.18503/2306-2053-2021-9-1-16-21.
