

Методика обоснования идеализированной математической модели контроля влажности зерна диэлькометрическим методом

Г. П. ЕРОШЕНКО, Н. К. ШАРУЕВ, Д. П. ЕВСТАФЬЕВ

*Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия,
e-mail: evstafevdp@yandex.ru*

Приведено обоснование идеализированной математической модели контроля влажности зерна диэлькометрическим методом, которая графически отображает электрофизические процессы в зерновках при воздействии электрического поля, а схемы замещения позволяют аналитически выразить связь влажности с электрическими параметрами зерна. Представлен анализ некоторых методик и средств эффективного использования диэлькометрического метода. Рассмотрен пример разработки электротехнического устройства контроля влажности зерна с инструментальной погрешностью менее 0,1 %.

Ключевые слова: диэлькометрия, контроль влажности зерна, электротехническое устройство.

Justification of the use of an idealized mathematical model for control of moisture content by a grain dielcometric method is given, which graphically shows the electrophysical processes in grains occurring under the influence of an electric field, and its equivalent connection allows to express analytically the relation of humidity and electrical parameters, ϵ and σ , of grain. The analysis of some methods and means of effective use of the dielcometric method are presented. Different variants of their solution are presented on the example of the development of an electric device to control grain moisture with an accuracy less than 0,1 %.

Key words: dielcometry, electrical device to control grain moisture.

В настоящее время для определения влажности на элеваторах и других предприятиях по хранению и переработке зерна используют тетраграмметрический метод, при котором продолжительность измерения в среднем достигает 1,5—2 ч. Широкое распространение этого метода обусловлено тем, что он универсален для всех видов сельскохозяйственных продуктов независимо от их компонентного состава и электрофизических свойств и обеспечивает погрешность измерений, которая соответствует большинству технологических требований производства, хранения и переработки. Диэлькометрический метод контроля влажности, компонентного состава и других базовых параметров сельскохозяйственных продуктов привлекает внимание исследователей не только возможностью достижения теоретически высокого быстродействия, поскольку его рабочая частота лежит в диапазоне 10^4 — 10^9 Гц, но и низкой инструментальной погрешности измерений до 0,1 % [1, 2].

При составлении математической модели обычно придерживаются следующей последовательности:

на основе законов физики, электротехники, дисперсной классификации продуктов [3], теории Дебая, Коула—Коула, с учётом известных математических моделей Вагнера, Лихтенкера, Оделевского, Рейнольдса, Хью [4] составляют и обосновывают наиболее близкую по свойствам математическую модель, оценивают её характеристики в выбранном рабочем диапазоне частот и других технических условий;

проводят целевые экспериментальные исследования для определения регрессионных коэффициентов статистическими методами согласно составленной математической модели;

на основе системного подхода выполняют ранжирование влияющих факторов путём оценки их погрешности.

Сложность и неоднозначность интерпретации полученных результатов во многом определяется конструкцией первичного преобразователя, от правильного выбора и расчёта которого зависит эффективность применяемой модели контроля влажности зерна. В данном случае конструкция измерительной ячейки позволяет снизить погрешность измерений благодаря локализации пробы в пространстве рабочей зоны и таким образом учесть некоторые специфические особенности зерна (плотность засыпки, эллипсоидную форму зерновок и др.). При конструировании такой ячейки, на взгляд авторов, необходимо:

обеспечить в рабочей зоне равномерность напряжённости электрического поля с погрешностью не более требуемой погрешности измерений всего устройства;

устранить влияние внешних электромагнитных полей и поверхностных краевых эффектов;

обеспечить универсальность измерений всех типов продуктов (диэлектрических, проводящих и с комплексным сопротивлением).

Таким образом, при составлении модели вначале необходимо обосновать конструкцию и оценить погрешность измерений собственной ёмкости измерительной ячейки.

Поскольку зерно, как правило, неоднородно по объёму, погрешность равномерности поля в рабочей зоне измерительной ячейки должна быть на порядок ниже требуемой погрешности измерений влажности зерна (0,1—1,0 %) при его переработке на технологических линиях на мукомольных и комбикормовых предприятиях, где возможно применение градуировки по образцам заказчика или согласованном стандартизованным методикам. В [5] зерновая масса рассматривается как сложная капиллярно-пористая колло-

идная гетерогенная система, в которой следует учитывать свойства совокупности влажных зерновок и воздушных полостей между ними, представляющая собой уплотняющуюся систему с упруго-деформируемыми элементами эллипсоидальной формы. Поэтому обычно выполняется предварительная подготовка пробы (например, измельчение), засыпка с уплотнением или вибрацией. Это позволяет снизить погрешность измерений, однако отнимает много времени (от нескольких секунд до 10 мин). В противном случае при контроле продуктов с неоднородной плотностью погрешность повторных измерений сильно возрастает.

Известно [6], что неоднородность поля во вкраплениях влаги будет сравнима с равномерностью поля в рабочей зоне (рис. 1). В этом случае ёмкости C_j каждого вкрапления можно рассчитать с заданной погрешностью, разбив на m идеализированных ёмкостей так, чтобы суммарная ёмкость отличалась от теоретически идеальной в пределах требуемой погрешности измерений:

$$C_j = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{\text{ср}} \varepsilon_{\text{в}} \frac{S_i}{d_i}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}$, $\varepsilon_{\text{в}}$ — диэлектрические проницаемости среды и вкраплений влаги, соответственно; S_i , d_i — площадь электродов ёмкостей разбиения вкраплений и расстояние между этими электродами.

На первом этапе проектирования использовали плоскопараллельный конденсатор [1] с охранными электродами с нулевым потенциалом, введение которых вокруг низкопотенциального электрода исключает влияние краевых полей и утечки тока. Равномерность поля устанавливали методом математического моделирования и с учётом принципа суперпозиции электростатических полей, точность расчёта которого определяется степенью разбиения объёма конденсатора, что позволяет получить решение задачи в общем виде, в том числе и для конденсаторов с электродами произвольной формы. Вначале находили количество электронов N на электродах конденсатора по формуле

$$N = C \Delta U / e,$$

где C — ёмкость конденсатора; ΔU — разность потенциалов на обкладках конденсатора; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд электрона.

Затем рассчитывали напряжённость поля в каждой i -й точке объёма конденсатора как

$$E = \sum_{i=1}^{2N \cdot N} E_i.$$

Для оценки погрешности λ_E в рабочей зоне конденсатора использовали расчёты относительных отклонений напряжённости поля E_i от напряжённости $E_{\text{ц}}$ в центре конденсатора:

$$\lambda_E = (E_{\text{ц}} - E_i) \cdot 100 / E_{\text{ц}}.$$

Аналитически установили, что на расстояниях $0,7d$; $1,1d$; $1,45d$ от края электродов при различных относительных размерах конденсатора d/l получены отклонения не более 1,0; 0,1; 0,01 %, соответственно (рис. 2).

На базе проведённых исследований равномерности поля в рабочей зоне конденсатора сформулировали следующие рекомендации при проектировании измерительных ячеек:

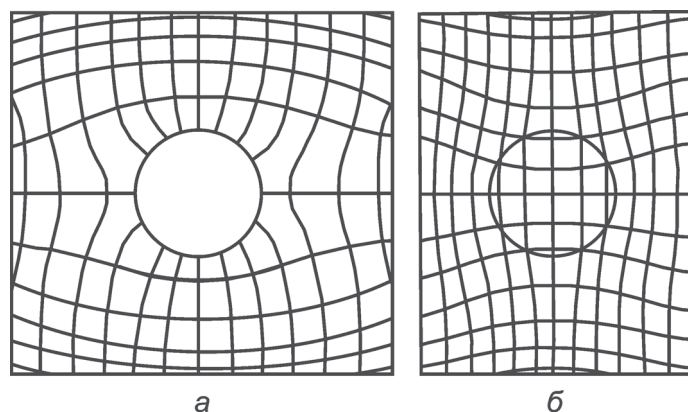


Рис. 1. Изображение силовых и эквипотенциальных линий равномерного электрического поля в диэлектрической среде после помещения в него незаряженного проводящего шара (а) и диэлектрического шара с проницаемостью ниже, чем у окружающей среды (б)

минимально допустимый размер контролируемой пробы определяется исходя из структуры зерновок и требований к её подготовке. Согласно статистическим исследованиям [1] минимальный габаритный размер измерительной

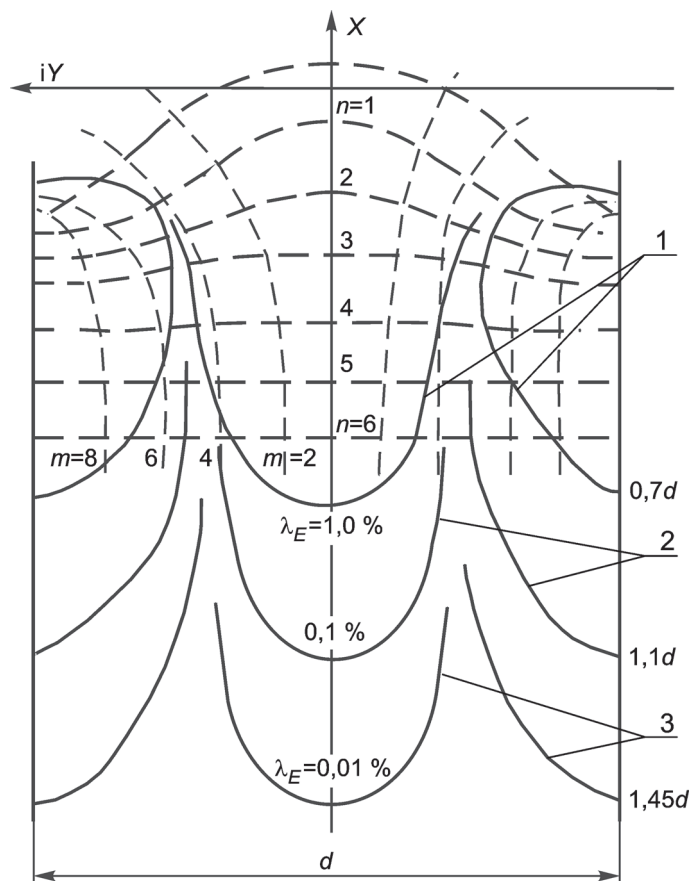


Рис. 2. Неравномерность напряжённости поля между пластинами плоскопараллельного конденсатора:

кривые 1, 2, 3 отделяют от края конденсатора зоны, где напряжённость поля отличается от напряжённости на осевой линии не более чем на 1,0; 0,1; 0,01 % соответственно; d — расстояние между пластинами электродов

ячейки должен быть не менее десяти максимальных размеров зерновок, в данном случае это расстояние d между электродами ячейки, что упрощает её конструирование при расчёте рабочей зоны;

для достижения погрешностей 0,01; 0,1; 1,0 % длина L охранной зоны должна быть равной $1,45d$; $1,1d$; $0,7d$, соответственно [1];

с учётом допустимых габаритных размеров измерительной ячейки и длины охранного электрода определяют геометрию или габаритные размеры низкочастотного электрода. Для снижения шунтирования входа электрической схемы расстояние между низкочастотным и охранным электродами должно быть минимальным.

На основании указанных рекомендаций проектируют реальную измерительную ячейку, параметры которой близки к идеализированной модели. Расчётная погрешность собственной ёмкости такой ячейки зависит только от конструкции и зазора между электродами, а её ёмкость при заполнении пробой будет

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d = \varepsilon C_0, \quad (2)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость влажного зерна; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — абсолютное значение проницаемости для вакуума; S , d — площадь и расстояние между пластинами электродов, соответственно.

Из (2) следует, что при оценке погрешности необходимо учитывать изменение геометрического фактора $g = S/d$ измерительной ячейки в условиях колебаний температуры, влажности и давления окружающей среды и ε , значение которой зависит от множества параметров.

Диэлькометрический метод основан на том, что поляризация диэлектрика является мерой диэлектрического тока смещения $I_{\text{см}}$, связанного с напряженностью E электрического поля и относительной диэлектрической проницаемостью ε зависимостью

$$I_{\text{см}} = \varepsilon \varepsilon_0 E. \quad (3)$$

Из (3) следует, что диэлектрическая проницаемость является мерой поляризации диэлектрика и константой, присущей данному веществу.

Согласно теории Дебая [4] положение области аномальной дисперсии (где происходит отставание по фазе ориентационной поляризации молекул от изменений поля) для сферических молекул связано с вязкостью раствора η и радиусом молекулы a и выражается временем релаксации τ , которое является постоянной времени затухания ориентационной поляризации:

$$\tau = 4\pi\eta a^3/(kT),$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T = 273$ К — абсолютная температура.

Электрические свойства любого вещества можно охарактеризовать относительной диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ так, что плотность полного тока в веществе является суммой токов проводимости и смещения, а полностью они описываются комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_{\text{эКВ}} = \varepsilon' - j(\varepsilon'' + \sigma/(\omega\varepsilon_0)),$$

где ε' , ε'' — активная и реактивная составляющие комплексной диэлектрической проницаемости, соответственно; ω — частота.

В зависимости от частоты и с учётом (2) можно записать

$$\varepsilon' = (\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty)/(1 + \omega^2 \tau^2); \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty)\omega\tau/(1 + \omega^2 \tau^2). \quad (5)$$

Для исследования поведения диэлектрика в области релаксационных потерь в [3] предложено строить графическую зависимость между функциями (4) и (5), по которой определять форму диэлектрических вкраплений. Для сферических молекул, имеющих одно время релаксации τ , центр полуокружности лежит на оси абсцисс.

На основании электрофизических свойств диэлектрических материалов были получены расчётные формулы влажности и состава для многокомпонентных материалов, представленных моделью в виде шарообразных или эллипсоидных частиц дисперсной фазы, взвешенных в однородной дисперсионной среде [3, 4]. Эквивалентные схемы измерений в общем случае представлены в виде последовательно-параллельных RC -цепочек. По измеренной ёмкости C (или сопротивлению R) рассчитываются ε' или ε'' . Рекомендуется применять параллельные RC -цепочки, поскольку такая эквивалентная схема не исключает возможность протекания постоянного тока между электродами. В [3, 4] математические модели и эквивалентные схемы измерений исследуются отдельно, и поэтому не связаны математически, т. е. все представленные модели относятся к продуктам только с диэлектрическими компонентами или с проводящими.

При составлении идеализированной модели контроля влажности зерна (см. рис. 1, б) необходимо учитывать, что диэлектрические шарики дистиллированной воды станут проводящими, если в воде присутствуют растворенные соли, кислоты и щелочи, и силовые линии электрического поля (см. рис. 1, а) замкнутся на их поверхностях. Однако, несмотря на значительную проводимость раствора, предложенная выше идеализированная модель работоспособна с заданной погрешностью измерения при влажности до 20 %. Затем при увеличении влажности вода уже не может вся диффундировать через оболочку зёрен и образует на их поверхностях плёнку такой толщины, что при засыпке в измерительную ячейку зерна слипаются, создавая непрерывные проводящие каналы-столбики вкрапления влаги между рабочими электродами ячейки. Поэтому при измерениях продуктов с комплексной проводимостью и влажности зерна более 20 % в идеализированной модели [7] в качестве формы вкраплений влаги предлагаем принять проводящие каналы-столбики между рабочими электродами (рис. 3).

Поскольку ёмкости всех вкраплений могут быть рассчитаны по (1) и включены параллельно друг другу, то общая ёмкость C_B влаги равна сумме ёмкостей всех вкраплений:

$$C_B = \sum_{j=1}^n C_j = \varepsilon_0 \varepsilon_B \frac{S_B}{d},$$

где n — количество каналов-столбиков в контролируемом продукте; S_B — площадь вкраплений.

Аналогично находят ёмкость C_C сухого зерна, тогда общая ёмкость C с влажным материалом может быть представлена в виде суммы ёмкостей двух конденсаторов C_B и C_C , которые включены параллельно:

$$C = C_B + C_C.$$

Эквивалентные электрические ёмкости, заполненные влажным веществом, влагой, и сухим веществом вычисляют как

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d; \quad (6)$$

$$C_B = \varepsilon_0 \varepsilon_B (S - S_c)/d; \quad (7)$$

$$C_c = \varepsilon_0 \varepsilon_c S_c/d. \quad (8)$$

Из совместного решения выражений (6)—(8) можно численно определить диэлектрическую проницаемость влажного продукта

$$\varepsilon = \varepsilon_c (1 + \alpha W (\varepsilon_B - \varepsilon_c) / \varepsilon_c), \quad (9)$$

где α — регрессионный коэффициент; W — влажность.

Из формул (6)—(9) найдём связь влажности с параметрами измерительной ячейки и диэлектрическими характеристиками влажного зерна в виде

$$W = b (C/(\varepsilon_0 \varepsilon_c g) - 1)/\alpha, \quad (10)$$

где $b = \varepsilon_c / (\varepsilon_B - \varepsilon_c)$ — биологический фактор.

Модель (10) справедлива только в идеализированном случае при условии устранения наиболее весомых мешающих влияний на геометрический g и биологический b факторы, таких как неравномерность поля в рабочей зоне измерительной ячейки, влияние внешних полей, изменения плотности засыпки зерна и геометрических размеров ячейки. Авторами предложена методика учёта и снижения этих мешающих влияний, что позволило уменьшить инструментальную погрешность измерений до 0,1%. Основными мешающими биологическими факторами при измерениях влажности являются: присутствие в продуктах воды и изменение её проводимости, обусловленное наличием электролитов; различные виды связи [5] влаги в зерновках, включая связанную химически, биохимически, физико-химически, физико-механически и свободную влагу; неравномерность распределения влаги между структурными органами зерновки и внутри них.

Необходимо также учитывать электрофизические свойства зерновок и биохимический состав органического вещества зерновок (содержание белка, крахмала, клейковины, сухой клетчатки).

Суммарная погрешность от влияния других мешающих факторов, особенно биологического, может быть минимизирована путём сравнения значений измеренной влажности со специально подготовленными эталонными образцами зерна в конкретных точках технологического процесса (например, по высоте силосов и на приёмном пункте элеватора, при запаривании зерна в линии приготовления комбикормов).

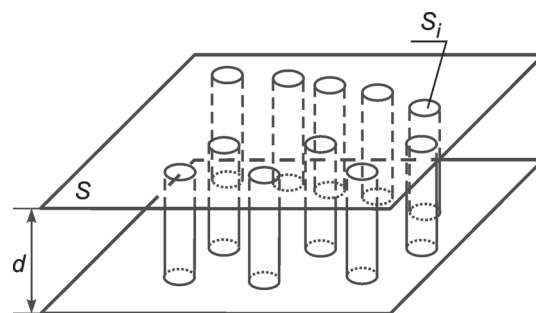


Рис. 3. Модель измерительной ячейки для контроля влажности зерна

Таким образом, при внедрении в производство электротехнических устройств контроля влажности для удовлетворительного решения вопроса оценки погрешностей всех составляющих биологического фактора необходимо также применять методику проведения измерений и сбора информации по оценке и ранжированию всех влияющих факторов.

Литература

1. **Ерошенко Г. П., Шаруев Н. К.** Электротехнические устройства контроля сельскохозяйственной продукции: монография. Саратов: Саратовский источник, 2012.
2. **Ерошенко Г. П., Шаруев Н. К., Парусов В. П., Шаруев В. Н.** Расширение функциональных возможностей диэлькометрического метода при контроле параметров молочных продуктов // Измерительная техника. 1999. № 9. С. 61—63.
3. **Рогов И. А., Горбатов А. В., Свинцов В. Я.** Дисперсные системы мясных и молочных продуктов. М.: Агропромиздат, 1990.
4. **Берлинер М. А.** Измерения влажности. М.: Энергия, 1973.
5. **Ананьев И. П.** Автогенераторные измерительные преобразователи двухкомпонентной диэлькометрии сельскохозяйственных материалов: Автореф. дис. на соиск. учён. степ. докт. техн. наук. СПб., 2009.
6. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1986.
7. **Шаруев Н. К., Шаруев В. Н.** Совершенствование емкостных методов контроля в технологических процессах агропромышленного комплекса // Аграрный научный журнал. 2010. Вып. 8. С. 55—58.

Дата принятия: 20.01.2016.