

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ВЛАЖНОСТИ БИОМАССЫ КАК ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Хусниддин Хусейн угли Абдуллаев
Азиатский Международный Университет

Аннотация. В данной статье проведен анализ выбора первичного преобразователя, обеспечивающих регулирования влажности биомассы и ее диэлектрической проводимости основанного диэлькометрическим методом при получении биогаза из отходов сельскохозяйственной продукции. В качестве сырья, используемого на основе технологии извлечения биогаза, проведены исследования, направленные на контроль влажности биомассы и построение математической модели гетерогенных смесей и информационно-измерительных систем с высокой точностью, выбора первичной преобразователя, разработка модели диэлектрической проницаемости для биомассы, учитывающая температуру материала, позволяющая оценить степень и характер влияния фактора на суммарную погрешность измерения влажности.

Ключевые слова: математическая модель, гетерогенная влажная система, диэлектрическая проницаемость, контроль влажности.

**MATHEMATICAL MODEL OF DIELECTRIC PERMEABILITY OF BIOMASS
MOISTURE AS OBJECTS OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM**

Husniddin Hussein ugli Abdullayev
Asia International University

Annotation. In this article, the analysis of the choice of a primary converter providing regulation of biomass moisture and its dielectric conductivity based on the dielkometric method for obtaining biogas from agricultural waste is carried out. As a raw material used on the basis of biogas extraction technology, studies have been carried out aimed at controlling the moisture content of biomass and building a mathematical model of heterogeneous mixtures and information-measuring systems with high accuracy, selecting a primary converter, developing a permittivity model for biomass, taking into account the temperature of the material, allowing to assess the degree and nature of the influence of the factor on the total measurement error humidity.

Keywords: mathematical model, heterogeneous wet system, permittivity, humidity control.

Растущее население, потребность в электроэнергии и природном топливе в значительной степени обуславливают развитие альтернативной электроэнергетики. В связи с этим устанавливается необходимость проведения обширных исследований по рациональному использованию биоэнергии. Одним из решений этой проблемы является получение биогаза из сельскохозяйственных отходов.

Одним из параметров, влияющих на его теплотворность при получении биогаза, является содержание влаги в биомассе. Для достижения поставленной цели был проведен анализ современного состояния проблемы, проведено исследование рассматриваемого вопроса, предложен метод решения и применения первичных преобразователей биомассового сырья контроля влажности в технологических процессах, рекомендованы преобразователи влажности исследуемых материалов.

На основе диэлькометрического метода контроля влажности биомассового сырья рассмотрена конструкция измерительных преобразователей высокочастотных систем, где учтена интеграция высокочастотных измерительных приборов для работы в структуре автоматизированных систем управления технологических процесса для непрерывного контроля и регулирования влажности.

Для того чтобы выбрать метод рассмотрим материалы у которых состав, структура, свойства или отношения между элементами структуры не постоянны по объему. К примеру, единственным критерием гетерогенности материала с позиции диэлькометрии является изменение макроскопических свойств по сравнению с однородной, изоморфной, гомогенной среды. Наиболее резко диэлектрические характеристики гетерогенной системы отличаются от свойств однородных материалов при больших концентрациях неоднородностей. По теории гетерогенной поляризации рассматриваются два типа концентрированных сред. Слабоконцентрированными считаются среды, в которых размеры неоднородностей малы по сравнению с расстояниями до ближайших элементов системы [1]. Сильноконцентрированные среды содержат такие включения, которые существенно влияют на свойства всего материала.

Для матричных систем характерно наличие некой общей фазы – матрицы, в которую вкраплены не связанные между собой частицы, составляющие вторую фазу.

В статических дисперсных системах диэлектрическая проницаемость представляет собой сложную функцию парциальных диэлектрических проницаемостей и объемных концентраций компонентов дисперсионной среды ε_1 , ν_1 и дисперсной фазы ε_2 , ν_2 , инвариантную к замене индексов

$$\varepsilon = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \nu_1, \nu_2) = f(\varepsilon_2, \varepsilon_1, \nu_2, \nu_1). \quad (1)$$

Это значит, что фазы статических дисперсных систем равноценны. При этом дисперсионная среда обволакивает дисперсные частицы, в результате чего в диэлектрических характеристиках системы ее параметры доминируют. Это приводит к инвариантности свойств системы относительно индексов фаз

$$\varepsilon = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \nu_1, \nu_2) \neq f(\varepsilon_2, \varepsilon_1, \nu_2, \nu_1). \quad (2)$$

Вода, как правило играет важную роль в диэлектрическом контроле гетерогенных влажных систем. Для воды, находящейся в свободном состоянии при комнатной температуре, в диапазоне частот диэлектрической проницаемости принимаются $10^5 \leq f \leq 10^8$ Гц значения $\epsilon \approx 81$. Высокое значение диэлектрической проницаемости является структурных особенности воды: водородные связи удерживают выделенное направление диполя молекулы в течение времени их «жизни», тем самым обеспечивая многократную поляризацию каждой молекулы, обусловленную активационно-флуктуационным механизмом теплового движения протонов на линии связи $O-H...O$. По экспериментальным данным [2], длина волны, соответствующая критической частоте, при температуре $t = 20^\circ C$ равна $\lambda_0 = 1,74 \text{ см}$. Значение ϵ_∞ принято считать равным 5,5 хотя по данным некоторых исследователей более точным и являются значения 4,5 или 4,9.

Для расчёта диэлектрической проницаемости на практике приходится обращаться к следующим формулам, изложенных в [3]:

1. Модель Максвелл-Вагнера для матричной двухкомпонентной смеси

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2 + 2V(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2 - V(\epsilon_2 - \epsilon_1)}, \quad (3)$$

где ϵ_c – диэлектрическая проницаемость смеси; ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость материала матрицы; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость материала включений; V - объемная концентрация (относительный объем) включений;

2. Модель Релея (для $V \ll 1$)

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \left(1 + 3V \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \right); \quad (4)$$

3. Модель Оделевского

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \left(1 + \frac{V}{\frac{1-V}{3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right); \quad (5)$$

4. Модель Кубо-Накамуры

$$3\epsilon_2 \lg \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_c}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right) - (\epsilon_2 - 0,74) \lg \left(\frac{\epsilon_1 + 0,37}{\epsilon_2 + 0,37} \right) = (2,2\epsilon_2 + 0,81) \lg(1 - V) \quad (6)$$

5. Модель Полдера-ван-Сантена

$$\epsilon_c = \epsilon_1 + \frac{1}{3} V (\epsilon_2 - \epsilon_1) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)} \right]; \quad (7)$$

где A_j – фактор формы, численное значение которого зависит от формы включений: для сферических частиц $A_1 = A_2 = A_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$; для дисков $A_1 = A_2 = 0, A_3 = 1$; для плоских пластин $A_1 = A_2 = 0,5, A_3 = 0$.

6. Модель Де Лура, которая представляет собой дальнейшее развитие модели Полдера-Ван-Сантена

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \frac{1}{3}V(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right)} \right]; \quad (8)$$

Формула (8) отличается от (7) тем, что в правой части вместо ε_1 (диэлектрическая проницаемость материала матрицы) записана величина ε^* (комплексной диэлектрической проницаемости – КДП) области, непосредственно примыкающей к частицам включений.

Если смесь содержит не два диэлектрических материала (например, хлопок-сырец), а три или более, формула (8) может быть записана в виде

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n V_i (\varepsilon_i - \varepsilon_c) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right)} \right]; \quad (9)$$

В моделях, описывающих диэлектрическую проницаемость статических смесей, должны соблюдаться следующие условия:

1) во-первых, значение КДП смеси ε_c должно удовлетворять неравенствам Винера

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\varepsilon_i} \right)^{-1} \leq \varepsilon_c \leq \sum_{i=1}^n V_i \varepsilon_i; \quad (10)$$

2) во-вторых, формула должна быть симметричной, т.е. ε_c - должна изменяться в зависимости от того, какие номера i мы будем присваивать тем или иным компонентом [4]. На формулы для матричных смесей требование симметрии не распространяется. Необходимо отметить, что все вышеприведённые модели применимы к физическим смесям, т.е. предполагается, что смешиваемые вещества не вступают друг с другом в химическое взаимодействие, при этом моделирование диэлектрической проницаемости гетерогенных влажных материалов с учетом химических процессов затрудняется.

Биомасса в первом приближении представляет собой трехфазную композицию, состоящую из клетчатки, влаги и воздуха, имеющие различные электрофизические свойства. Электрофизические параметры влажных материалов биологических отходов как композиционных макро-и микронеоднородных систем описываются в основном процессами миграционной поляризации, роль которых существенно

возрастает с понижением частоты. Физической основой миграционной поляризации является перемещение слабосвязанных ионов в объеме диэлектрика на значительное расстояние, соизмеримое с толщиной всего диэлектрика [5]. Эти перемещения приводят к образованию пространственных зарядов на границах раздела диэлектрика, поэтому эта поляризация называется межслоевой. Время, затрачиваемое на такие перемещения велико, поэтому идет запаздывание.

При переменном напряжении синусоидальной формы плотность абсорбционного тока, определяемая медленно устанавливающейся поляризацией, равна:

$$J_{аб} = \frac{E_m e^{i\omega t}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\omega^2 \tau^2 \gamma + i \omega \tau \gamma), \quad (11)$$

где τ – время релаксации; γ – электропроводность; ω – угловая частота; E_m – действующее значение напряженности электрического поля.

Амплитуда плотности емкостного тока выражена как

$$J = \omega \epsilon_0 \epsilon E_m. \quad (12)$$

Из последних уравнений получим величину диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon = \frac{\tau \gamma}{\epsilon_0 (1 + \omega^2 \tau^2)}. \quad (13)$$

При наличии разных видов поляризации с различными τ и γ величина ϵ очевидно будет равна:

$$\epsilon = \sum_i \frac{\tau_i \gamma_i}{\epsilon_0 (1 + \omega^2 \tau_i^2)}. \quad (14)$$

Согласно [1], отношение $\epsilon_{0,2} / \epsilon_{20}$ быстро растет с увеличением влажности W . Известно, что механизм влияния температуры на величину емкости датчика, т.е. на диэлектрическую проницаемость влажного материала, определяется изменением при нагревании соотношения в материале количеств связанной и свободной влаги – где диэлектрическая проницаемость связанной влаги гораздо ниже (≈ 5), чем 81. Для диэлькометрических измерительных систем в диапазоне ниже 10^8 Гц влияние температуры можно учесть введением температурной коррекции к результатам измерения по формуле:

$$W = W_{II} - k_i (t - t_0), \quad (15)$$

где W – истинная влажность материала при температуре t ; W_{II} – результат отсчета влажности по шкале; t и t_0 – температура материала соответственно в момент измерения и при градуировке измерительных приборов влажности; k_i – температурный коэффициент для данного материала.

В результате комплексная диэлектрическая проницаемость биомассы рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{a}{i\omega\varepsilon_0} e^{-\frac{B}{T}} + \sum_i \frac{\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{xi}}{1 + i\omega A_i \cdot e^{-\frac{B_i}{T}}} \quad (16)$$

С ростом температуры ε при $\omega\tau \gg 1$ увеличивается, так как уменьшается τ и поляризация за время полупериода приложенного напряжения развивается в большей степени. Отмеченные выше особенности материалов необходимо принимать во внимание при математическом описании диэлектрических свойств исследуемых материалов от влажности. Диэлектрические свойства влажных материалов описываются формулами смесей, являющимися достаточно точными для влагосодержащих жидкостей.

При экспериментальном исследовании в поле высокой частоты диэлектрических свойств таких материалов, как биомасса, необходимо решать следующие малоизученные задачи [6-8]:

- определение и анализ функций преобразования первичного измерительного высокочастотного преобразователя; для этого необходимо экспериментальным путем исследовать зависимости диэлектрических свойств исследуемых продуктов от влажности важнейших влияющих факторов.
- построение на основе полученных экспериментальных данных электрической модели первичного преобразователя, с оптимальной аппроксимацией реальных характеристик исследуемых материалов.
- реализация полученных данных путем разработки высокочастотных приборов контроля влажности для дисперсных и неоднородных материалов и их испытании в лабораторных и производственных условиях.

На основе выполненного анализа можно констатировать следующее:

1. Проведенный анализ показывает, что в известных работах недостаточно уделено внимания разработке универсальных аналитических моделей диэлектрических свойств гетерогенных систем вообще и дисперсных влагосодержащих тел в частности. Одним из основных причин неудовлетворительности известных формул смеси при их применении к влажному материалу – отсутствие учета влияния видов и форм связи влаги на электрофизические свойства материала.
2. При проектировании диэлькометрических средств технологического контроля параметров гетерогенных систем достаточно охватить диапазон от инфракрасных до десятков мегагерц, поскольку именно в этом частотном диапазоне проявляются факторы структурой поляризации.
3. Модель диэлектрической проницаемости для биомассы, которая учитывает температуру, материала, позволяет оценить степень и характер влияния фактора на суммарную погрешность измерения её влажности и, следовательно, может быть использована для введения в результат измерения необходимых поправок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ю.П. Емец. Дисперсия диэлектрической проницаемости трех- и четырехкомпонентных матричных сред // Журнал технической физики, 2003, Том 73. Вып.3. -С.42-53.
2. Т.Л. Челидзе и др. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1977. –232 с.
3. П.А. Федюнин и др. Микроволновая термовлагодетрия / Под общ. ред. П.А. Федюнина. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. –208 с.
4. С. В. Мищенко, Н. А. Малков. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. –128 с.
5. А. Ф. Котюк Датчики в современных измерениях. –М.: Радио и связь, Горячая линия-Телеком, 2006. –96 с.
6. Искандаров Б.И., Каландаров П.И. Анализ влияния факторов на результат измерений влажности материала на высоких частотах. // Измерительная техника. №7, - 2013, - с. 64-66.
7. Kalandarov P.I., Abdullayev X.X. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. T. 1043. № 1. C. 012011.
8. Каландаров П.И., Мукимов З.М., Абдуллаев Х.Х., Авезов Н.Э. Математическая и эмпирическая основа измерение влажности твердых и сыпучих материалов. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2021. Т. 9. № 1. С. 16-21.
9. Jalolov, T. S. (2023). PSIXOLOGIYA YO ‘NALISHIDA TAHSIL OLAYOTGAN TALABALARGA SPSS YORDAMIDA MATEMATIK USULLARNI O ‘RGATISHNING METODIK USULLARI. Educational Research in Universal Sciences, 2(10), 323-326.
10. Jalolov, T. S. (2023). PYTHON INSTRUMENTLARI BILAN KATTA MA'LUMOTLARNI QAYTA ISHLASH. Educational Research in Universal Sciences, 2(10), 320-322.
11. Jalolov, T. S., & Usmonov, A. U. (2021). “AQLLI ISSIQXONA” BOSHQARISH TIZIMINI MODELLASHTIRISH VA TADQIQ QILISH. Экономика и социум, (9 (88)), 74-77.
12. Sadriddinovich, J. T. (2023). Capabilities of SPSS Software in High Volume Data Processing Testing. American Journal of Public Diplomacy and International Studies (2993-2157), 1(9), 82-86.
13. Sadriddinovich, J. T. (2023, November). IDENTIFYING THE POSITIVE EFFECTS OF PSYCHOLOGICAL AND SOCIAL WORK FACTORS BETWEEN INDIVIDUALS AND DEPARTMENTS THROUGH SPSS SOFTWARE. In

INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH CONFERENCE (Vol. 2, No. 18, pp. 150-153).

14. Jalolov, T. S. (2023). TEACHING THE BASICS OF PYTHON PROGRAMMING. International Multidisciplinary Journal for Research & Development, 10(11).

15. Jalolov, T. S. (2023). Solving Complex Problems in Python. American Journal of Language, Literacy and Learning in STEM Education (2993-2769), 1(9), 481-484.

16. Jalolov, T. S. (2023). PEDAGOGICAL-PSYCHOLOGICAL FOUNDATIONS OF DATA PROCESSING USING THE SPSS PROGRAM. INNOVATIVE DEVELOPMENTS AND RESEARCH IN EDUCATION, 2(23), 220-223.

17. Jalolov, T. S. (2023). ADVANTAGES OF DJANGO FEMWORKER. International Multidisciplinary Journal for Research & Development, 10(12).

18. Jalolov, T. S. (2023). ARTIFICIAL INTELLIGENCE PYTHON (PYTORCH). Oriental Journal of Academic and Multidisciplinary Research, 1(3), 123-126.

19. Jalolov, T. S. (2023). SPSS YOKI IJTIMOIIY FANLAR UCHUN STATISTIK PAKET BILAN PSIXOLOGIK MA'LUMOTLARNI QAYTA ISHLASH. Journal of Universal Science Research, 1(12), 207–215.

20. Jalolov, T. S. (2023). THE MECHANISMS OF USING MATHEMATICAL STATISTICAL ANALYSIS METHODS IN PSYCHOLOGY. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 138-144.

21. Jalolov, T. S. (2023). PROGRAMMING LANGUAGES, THEIR TYPES AND BASICS. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 145-152.

22. Jalolov, T. S. (2023). PYTHON TILINING AFZALLIKLARI VA KAMCHILIKLARI. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 153-159.

23. Jalolov, T. S. (2023). PYTHON DASTUR TILIDADA WEB-ILOVALAR ISHLAB CHIQISH. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 160-166.

24. Jalolov, T. S. (2023). SUNIY INTELLEKTDADA PYTHONNING (PYTORCH) KUTUBXONASIDAN FOYDALANISH. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 167-171.

25. Jalolov, T. S. (2023). WORKING WITH MATHEMATICAL FUNCTIONS IN PYTHON. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 172-177.

26. Jalolov, T. S. (2023). PARALLEL PROGRAMMING IN PYTHON. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 1(5), 178-183.

27. Tursunbek Sadriddinovich Jalolov. (2023). STUDY THE PSYCHOLOGY OF PROGRAMMERS. American Journal of Public Diplomacy and International Studies (2993-2157), 1(10), 563–568.

28. Jalolov, T. S. (2023). MATH MODULES IN C++ PROGRAMMING LANGUAGE. Journal of Universal Science Research, 1(12), 834-838.

29. Jalolov, T. (2023). UNDERSTANDING THE ROLE OF ATTENTION AND CONSCIOUSNESS IN COGNITIVE PSYCHOLOGY. Journal of Universal Science Research, 1(12), 839-843.

Сведения об авторах.

Каландаров Палван Искандарович. доктор технических наук, профессор НИУ «ТИИИМСХ». Тел. +998935552552, E-mail: eest_uz@mail.ru

Абдуллаев Хусниддин Хусейн угли. Доктор философии (PhD) по техническим наукам, Бухарский институт управления природными ресурсами при национальном исследовательском университете "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства". Тел. +998914134293

E-mail: husniddin.abdullayev9395@gmail.com