УДК 664.8.037.5

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Бельза В.А., аспирант,

Стручаев Н.И., канд. техн. наук

Мелитопольский государственный университет, г. Мелитополь, Россия

Аннотация. Представлена методика экспериментального определения удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости растительного сырья в широком частотном диапазоне. Описаны требования к измерительному оборудованию, подготовке образцов, проведению измерений и обработке результатов. Указаны основные источники погрешностей и предложены способы их минимизации.

Ключевые слова: замораживание, диэлектрическая проницаемость, методика, электрофизические характеристики, удельное электрическое сопротивление, растительное сырье.

Постановка проблемы. Изучение электрофизических характеристик растительного сырья представляет интерес как для фундаментальных исследований структуры растительных тканей, так и для прикладных задач, связанных с воздействием электромагнитных полей и совершенствованием технологий замораживания. Электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость чувствительны к изменениям влажности, температуры, состояния клеточных структур, поэтому их корректное экспериментальное

определение позволяет выявлять физико-химические изменения, происходящие в образцах при охлаждении и замораживании.

Целью данной работы является изложение воспроизводимой лабораторной методики измерения электрофизических параметров свежих и замороженных образцов растительного сырья, основанной на контролируемых условиях эксперимента и корректной интерпретации импедансных характеристик.

Основные материалы исследования. В качестве основных исследуемых параметров рассматривается удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость образцов в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц при различных температурах.

В качестве оборудования используется генератор гармонических сигналов с диапазоном частот не менее 100 Гц – 1 МГц и стабильностью не хуже 0,5 %, два цифровых вольтметра с погрешностью не выше 1 %, цифровой миллиамперметр или измеритель тока на основе шунта, известное сопротивление (магазин сопротивлений) с допускаемой погрешностью не более 0,1 % и измерительная ячейка, представляющая собой плоский конденсатор с параллельными металлическими пластинами, между которыми размещается образец. В качестве электродов используются две плоские пластины размером 100 × 100 мм (10 × 10 см) и толщиной не менее 2 мм для обеспечения геометрической стабильности и механической прочности при прижиме. Размеры электродов подбираются таким образом, чтобы обеспечить однородное распределение поля в пределах измеряемого объема и минимизировать краевые эффекты. Материал электродов – алюминий или латунь с чистой, отшлифованной поверхностью. Для минимизации краевых эффектов предусматривается использование защитного экрана и диэлектрического корпуса. Расстояние между электродами (толщина образца) задается в пределах 10–15 мм.

Сигнал с генератора подается на образец через последовательный эталонный резистор известного номинала, что позволяет по падению напряжения на резисторе и образце рассчитать ток в цепи и импеданс материала.

Для этого используются показания вольтметров и амперметра. При низких частотах (до 1 кГц) активное сопротивление определялось по закону Ома, при более высоких – с учётом реактивной составляющей, связанной с ёмкостью образца. Сопротивление рассчитывается по известному току и измеренному напряжению, а затем пересчитывается в удельное значение [1] с учётом геометрии ячейки по формуле:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \tag{1}$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление образца, Ом·м,

R – измеренное электрическое сопротивление образца, Ом,

S – площадь электрода, контактирующего с образцом, м²,

l – расстояние между электродами, м.

Диэлектрическая проницаемость [2] определяется по формуле для плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \tag{2}$$

где S - площадь обкладок конденсатора, м²,

d - расстояние между обкладками, м,,

ε- диэлектрическая проницаемость диэлектрика,

ε_0 = 8,85 10^{-12} Ф/м – электрическая постоянная.

Отсюда вытекает соотношение:

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}, \tag{3}$$

которое позволяет вычислить искомую диэлектрическую проницаемость, если известны емкость конденсатора *C*, площадь обкладок *S* и расстояние между ними *d*.

Способ измерения емкости *C* может быть получен с помощью цепи, изображенной на рис. 1., в которой R_0 - известное сопротивление.

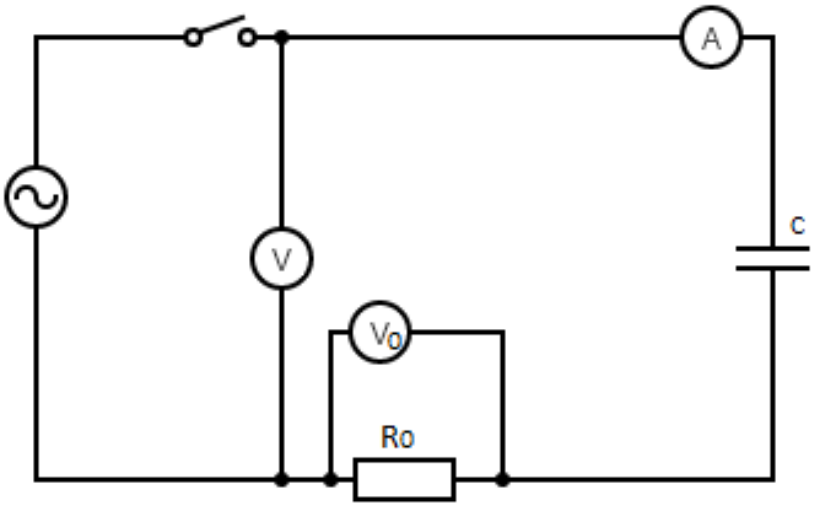

Рис. 1. – Схема подключения

Если U_d измеренное на вольтметре *V* и U_{0d} измеренное на вольтметре V_0 - действующие значения напряжений на конденсаторе *C* и резисторе R_0, то для действующего значения силы тока в цепи можно написать соотношение:

$$I_d = \omega C \cdot U_d = \frac{1}{R_0} U_{0\mathrm{d}}\,, \tag{4}$$

из которого следует, что

$$C = \frac{1}{\omega R_0} \cdot \frac{U_{0d}}{U_d}, \tag{5}$$

где: ω - круговая (циклическая) частота, рад/с.

Круговая частота связана с обычной частотой ν:

$$\nu = 1/T, \tag{6}$$

где T – период, с, соотношением:

$$\omega = 2\pi\nu. \tag{7}$$

В качестве исследуемых образцов используем спаржевую фасоль сахарных сортов.

Подготовка образцов включает отбор однородных по размеру фасолин, протирание поверхности от влаги и укладку в один слой между электродами. Толщина слоя измеряется с помощью штангенциркуля с точностью 0,1 мм, площадь электродов фиксируется заранее. Для замороженных образцов измерения проводятся в теплоизолированной ячейке сразу после извлечения из морозильной камеры, с контролем температуры, чтобы избежать подтаивания.

Температура и влажность играют критическую роль, поскольку содержание влаги существенно влияет на электропроводность и диэлектрические свойства. Поэтому образцы измеряются сразу после укладки, а их масса контролируется для учёта возможных отклонений по влажности. Все измерения проводятся при напряжении не выше 5 В, чтобы избежать нагрева образца и ионизации поверхностной влаги. Частоты изменяются дискретно в пределах заданного диапазона 100 Гц – 1 МГц, в пределах которого обеспечивается стабильность сигнала и достаточная чувствительность схемы [3,4].

Все измерения повторяются не менее трёх раз для получения статистически стабильного результата.

Полученные данные сравниваются между свежими и замороженными образцами, а также анализируются с учётом

температуры, чтобы установить возможную температурную зависимость электрических характеристик. Данная методика экспериментального определения удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости растительного сырья учитывает ранее накопленный нами опыт, отраженный в работах [5,6].

Для снижения влияния паразитных параметров рекомендуется проводить калибровку пустой ячейки и учитывать её собственную емкость.

Выводы. Методика достаточно воспроизводима и пригодна для использования в учебной или исследовательской лаборатории при отсутствии сложного оборудования. Основными ограничениями метода являются чувствительность к нестабильной влажности, влияние формы образцов и паразитных ёмкостей, поэтому результаты следует интерпретировать с учётом возможной погрешности, не превышающей 10–15 % при соблюдении условий эксперимента. Тем не менее, такая схема, позволяет получить обоснованные сравнительные оценки и установить достоверные тенденции изменения электрофизических параметров растительного сырья.

Статья написана по результатам научных исследований по программе FRRS-2023-0024 «Исследование воздействия электромагнитного и ультразвукового полей на продукты и материалы» ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет».

Список использованных источников

1. Расчёт удельного сопротивления // Радиосхемы [Электронный ресурс] – URL: https://radioskot.ru/publ/teoria/raschyot-udelnogo-soprotivleniya. (дата обращения 11.08.2025)

2. Грознов И. Н. Диэлектрическая проницаемость // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал [Электронный ресурс] – URL: https://bigenc.ru/c/dielektricheskaia-pronitsaemost-adb8e2/?v=7171568. (дата обращения 11.08.2025)

3. Малышкина И.А. Основы метода диэлектрической спектроскопии. Учебное пособие. - М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 80 с.

4. Горшков, С.Н., Авксентьев, Ю.И. Измерение диэлектрической проницаемости. Лаб. работа № 69. - М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 13 с.

5. Исследование электрических свойств компонентов семян клещевины / Чебанов А.Б. и др. // Вестник Рязанского ГАТУ. 2024. Т. 16. № 4. С. 167-175.

6. Обоснование параметров электрической схемы замещения компонентов семян клещевины / А. Б. Чебанов и др.// Известия Самарской ГСА. – 2024. – № 4. – С. 72-80.