

МЕТОД ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ УВЛАЖНЁННЫХ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ

¹**А.В. Чжан**, доктор физико-математических наук, профессор

²**Н.А. Дрокин**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

³**Н.М. Ничкова**, старший преподаватель

³**Ж.М. Мороз**, кандидат физико-математических наук, доцент

¹*Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия*

³*Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Россия*

E-mail: avchz@mail.ru

Ключевые слова: зерно, импеданс, влажность, проводимость, диэлектрическая проницаемость.

Реферат. Представлены результаты исследования электрических и диэлектрических характеристик увлажнённых зёрен пшеницы методом измерений их комплексного электрического сопротивления (импеданса Z) в широком диапазоне частот (от 1 Гц до 100 МГц). Результаты измерений электрического импеданса зерна с поверхностным или объёмным содержанием влаги в разных условиях эксперимента могут дать полезную информацию о свойствах биологических тканей зерновых культур и использоваться для разработки нового типа импедансных датчиков для тестирования качества зерна и его влажности. В качестве объекта исследований использовались хорошо высушенные зёрна пшеницы и зёрна, насыщенные влагой и солевым раствором. Серьёзной проблемой при измерениях импеданса зёрен является выбор подходящего материала электродов, накладываемых на торцевые поверхности образцов. Электроды должны обеспечивать надёжный контакт с зерном и обладать минимальным переходным сопротивлением. Для исключения поперечной деформации торцевые поверхности прессованных образцов укрепляли защитным диэлектрическим кольцом. Такие контакты обеспечивали переходное сопротивление в пределах 1–2 Ом. В области низких частот выявлены процессы накопления электрических зарядов вблизи поверхности металлических электродов и на внутренних структурах зерна, приводящие к увеличению диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. В области более высоких частот поведение активной и реактивной компонент импеданса определяется процессами диэлектрической релаксации. Полученные спектры импеданса сопоставлялись со спектрами наиболее подходящих эквивалентных электрических схем, радиотехнические компоненты которых позволяют понять основные механизмы прохождения переменного электрического тока через сложную неоднородную структуру зерна. Установлено, что увлажнение зерна подсолённой водой усиливает процесс накопления электрических зарядов и влияет на дисперсию действительной и мнимой компонент импеданса.

IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD FOR TESTING MOISTENED WHEAT GRAIN CROPS

¹**A.V. Zhan**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

²**N.A. Drokin**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

³**N.M. Nishkova**, Senior Lecturer

³**Zh.M. Moroz**, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

¹*Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

²*Institute of Physics named after L.V. Kirensky Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, Russia*

³*Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - Branch of Irkutsk State University of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia*

E-mail: avchz@mail.ru

Keywords: grain, impedance, moisture, conductivity, dielectric constant.

Abstract. The authors presented the results of a study of the electrical and dielectric characteristics of wetted wheat grains by measuring their complex electrical resistance (impedance Z) in a wide frequency range (from 1

Hz to 100 MHz). The results of electrical impedance measurements of grains with surface or volumetric moisture content under different experimental conditions can provide useful information on the properties of the biological tissues of grain crops. These results can also be used to develop a new type of impedance sensor for testing grain quality and moisture content. The authors used well-dried wheat grains and grains saturated with moisture and saline as objects of research. A major problem in grain impedance measurements is the selection of a suitable electrode material to be placed on the end surfaces of the samples. The electrodes must ensure reliable contact with the grain and have a minimum transient resistance. The end surfaces of the pressed samples were reinforced with a protective dielectric ring to prevent transverse deformation. These contacts provided a transition resistance between 1-2 ohms. The authors have identified processes of accumulation of electric charges near the surface of metal electrodes at low frequencies and on internal grain structures, leading to an increase in the dielectric permittivity and dissipation factor. The behavior of the active and reactive components of the impedance at higher frequencies is determined by dielectric relaxation processes. The obtained impedance spectra were compared with the spectra of the most suitable equivalent electrical circuits. The radio components of the circuits provide information about the basic mechanisms of alternating electric current flow through the complex inhomogeneous structure of the grain. The authors found that moistening the grain with saline water enhances the process of accumulation of electric charges and affects the dispersion of the real and imaginary components of the impedance.

Одним из главных элементов, определяющих жизнедеятельность биологических систем, в частности семян и других растительных культур, является вода, находящаяся на их поверхности и в объёмных структурах. Влажность – это важнейший показатель качества зерна как в пищевой промышленности, так и при его хранении и посеве. В свою очередь, содержание влаги в зерне зависит от сорта зерновой культуры, внутренней плотности зерна и качества воды. Влажность характеризует также количество питательных веществ в зерне и его пригодность к потреблению и переработке. При достижении зерном критической влажности процессы жизнедеятельности в зерне (дыхание, прорастание и т. п.) начинают нарастать, и активно развиваются микроорганизмы. Влажное, а тем более сырое зерно при хранении теряет посевные и пищевые достоинства. Влага, попав на поверхность зерна, в дальнейшем может проникнуть и внутрь зерна, образуя более сильную структурную связь, которая может длительное время сохраняться в областях зерна, наиболее богатых белками и крахмалом. На поверхности зерна влага обычно заполняет микрокапилляры и удерживается молекулярными силами. Эта влага может быть удалена при тепловой обработке (сушке) зерна [1, 2]. Зерно хорошо хранится в сухом состоянии, при этом в нем практически отсутствует свободная влага. Вся внутренняя вода связана с гидрофильными коллоидами зерна.

Граница влажности, при которой в зерне появляется свободная вода, зависит от химического состава, культуры и от ее анатомического строения. Для определения этой границы и поддержания в зерне необходимого количества влаги, как в связанном, так и в свободном состоянии, российский и зарубежный

рынок предлагает различные технические средства контроля влажности зерна. Наиболее популярные влагомеры основаны на измерениях электрических потенциалов семян, электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости (ДП) [3–5]. Тем не менее остаётся много вопросов о точности измерений и реальной влажности зерна, так как на практике в измерительных ячейках находится воздушно-зерновая смесь [4]. Особенно большие ошибки измерений могут возникать при наличии в образце адсорбированной воды с содержанием даже незначительного количества обычной или минеральной соли и других ионных примесей. Это требует дальнейшего развития не только технических средств определения общей влажности, но и более подробного изучения физических свойств как свободной, так и связанной воды во внутренних структурах зерна.

В данной работе представлены результаты исследования электрических и диэлектрических характеристик увлажнённых зёрен пшеницы методом измерений их комплексного электрического сопротивления (импеданса Z) в широком диапазоне частот. Этот метод основан на регистрации протекающего через образец переменного электрического тока и фиксации сдвига фазы (φ) между током и напряжением в диапазоне частот от нескольких долей герц до десятков и сотен мегагерц. Полученные данные позволяют рассчитать дисперсию действительной и мнимой компонент комплексной диэлектрической проницаемости, комплексной электрической проводимости, определить характерное время электрической релаксации и другие электрофизические характеристики зерна. Прохождение электрического тока через такой образец всегда можно сопоставить с аналогичным

протеканием тока через определённые модели электрических $R-L-C$ -схем, радиотехнические элементы которых в некоторой степени отражают внутренние свойства исследуемого материала. Метод импеданса в настоящее время широко применяется не только в науке [6, 7] и технике, но и для изучения биологического строения некоторых сельскохозяйственных, животных и растительных объектов [8–10].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе в качестве объекта исследований использовались хорошо высушенные зёрна пшеницы и зёрна, насыщенные влагой и солевым раствором. Исходная партия взятых из хранилища зерен выдерживалась при комнатной температуре в течение месяца, а затем проводилось их насыщение влагой путём увлажнения поверхности зёрен при комнатной температуре. Влажность образцов оценивалась по разнице в массе между исходными и подвергнутыми воздействию влаги зёрнами. Подготовленные к исследованиям зёрна в количестве 5–7 штук помещали в стальную пресс-форму и сжимали под давлением 40 МПа для уменьшения воздушных промежутков между ними. В результате создавались плотные образцы цилиндрической формы диаметром 10,6 мм и толщиной от 1,25 до 2,27 мм.

Серьёзной проблемой при измерениях импеданса зёрен является выбор подходящего материала электродов, накладываемых на торцевые поверхности образцов. Электроды должны обеспечивать надёжный контакт с зерном и обладать минимальным переходным сопротивлением. В данном эксперименте использовались электроды из алюминиевой фольги или тонко раскатанного индия, которые прижимали к торцевым поверхностям образца миниатюрной струбиной. Для исключения поперечной деформации торцевые поверхности прессованных образцов укрепляли защитным диэлектрическим кольцом. Такие контакты обеспечивали переходное сопротивление в пределах 1–2 Ом.

Измерительная ячейка с образцами зерна при комнатной температуре подключалась к анализаторам спектров Elns 1500J или Agilent E5061B, которые позволяют регистрировать проходящий через образец переменный электрический ток и сдвиг фазы между током и напряжением φ° . Затем программно рассчитывается комплексный электрический

импеданс $Z^* = U \cdot \sin(\omega t) / J \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ (Ом) и вместе с фазой φ° выводится на внешний носитель информации в диапазоне частот от 0,1 Гц до 100 МГц. Подаваемое на электроды измерительной ячейки переменное напряжение составляло величину $U_{ac} = 0,25$ В. В эксперименте эти данные использовались для дальнейших расчётов действительной и мнимой составляющих импеданса $Z'(f) = Z^*(f) \times \cos \varphi(f)$ и $Z''(f) = Z^*(f) \sin \varphi(f)$, которые позволяют определять частотные зависимости удельной проводимости (σ') и (σ''), действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости, частотно-зависимую ёмкость (C), сопротивление (R) и

$$\sigma'(\omega) = Y'(\omega) \frac{d}{S}, \sigma''(\omega) = Y''(\omega) \frac{d}{S}; \quad (1)$$

$$\epsilon'_{eff}(\omega) = \frac{-Z''(\omega)}{\omega C_0 (Z'^2(\omega) + Z''^2(\omega))}, \quad (2)$$

$$\epsilon''_{eff}(\omega) = \frac{Z'(\omega)}{\omega C_0 (Z'^2(\omega) + Z''^2(\omega))};$$

$$C(\omega) = \frac{-Z''(\omega)}{\omega R(\omega) Z'(\omega)}, \quad (3)$$

$$R(\omega) = Z'(\omega) \cdot \left[1 + \left(\frac{-Z''(\omega)}{Z'(\omega)} \right)^2 \right],$$

тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta = Z'(f) / -Z''(f)$ с применением следующих соотношений:

где ω – круговая частота; S – площадь обкладок конденсатора; d – толщина образца; $Y' = 1/Z'$, $Y'' = 1/Z''$ – действительные и мнимые компоненты адмиттанса; C_0 – геометрическая ёмкость измерительной ячейки. Относительная погрешность измерений импеданса находилась в пределах 3–5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начале эксперимента тестировалось хорошо просушенное зерно, статическое электрическое сопротивление которого превышало $R > 10^8$ Ом. Это зерно можно отнести к классу диэлектриков, поэтому его тестирование проводилось индивидуально с применением высокоомного моста E7-8 и Q-метров Tesla BM-560 и BM 409G. На нескольких фиксированных частотах измерялись ёмкость

и добротность измерительной ячейки с зерном, а затем рассчитывались действительная

и мнимая компоненты ДП. Результаты таких измерений приведены на рис. 1.

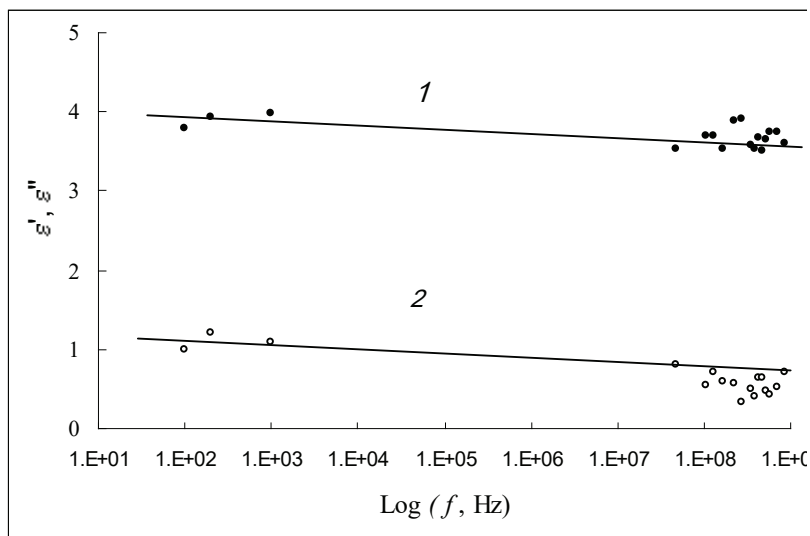


Рис. 1. Частотная зависимость действительной (1) и мнимой (2) компонент диэлектрической проницаемости сухого зерна

Fig. 1. Frequency dependence of real (1) and imaginary (2) components of dry grain permittivity

Как видно, полученные значения действительной компоненты ДП (1) сухого зерна в области низких и высоких частот находятся в пределах $\epsilon' = C_x / C_0 = 3,9 - 3,7$, а мнимая компонента ДП (2) имеет величину $\epsilon'' = 1,2 - 0,5$. Рассчитанные значения тангенса угла потерь $\text{tg } \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ меняются с возрастанием частоты от 0,8 до 0,3. Возможно, что достаточно высокие диэлектрические потери в сухом зерне возникают из-за наличия в нём некоторого количества связанной воды.

На рис. 2 приведены экспериментально измеренные спектры модуля импеданса (1) и фазы (2) для образца зерна, насыщенного влагой. Пунктирными линиями (3) и (4) показаны результаты расчетов импеданса и фазы наиболее простой радиотехнической (RC) модели зерна. Эта модель содержит некоторую усреднённую постоянную ёмкость – моделирующую ячейку с образцом $C = 6 \times 10^{-13} \text{ Ф}$, и параллельно включенный резистор $R = 1,8 \times 10^7 \text{ Ом}$, моделирующий сопротивление образца.

Рис. 2. Дисперсия импеданса (1) и фазы (2) образца зерна, насыщенного влагой.

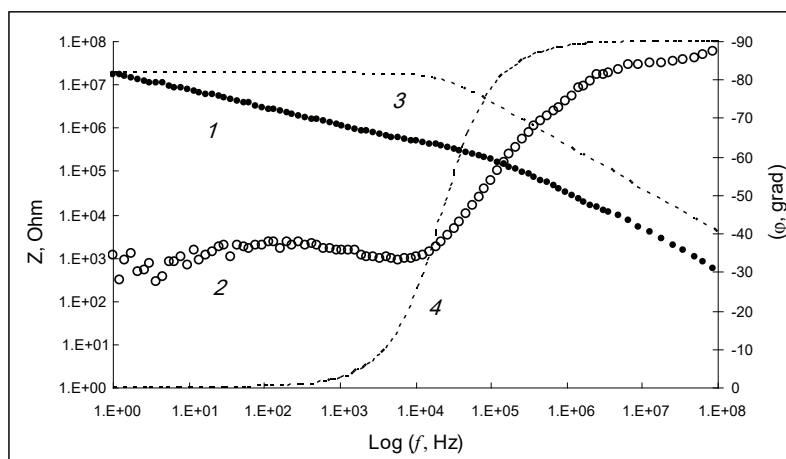


Рис. 2 Пунктирные линии (3) и (4) – расчёт импеданса и фазы параллельной RC- эквивалентной схемы

Fig. 2. Dispersion of impedance (1) and phase (2) of a grain sample saturated with moisture. Dashed lines (3) and (4) Calculation of the impedance and phase of the equivalent parallel RC circuit

Как видно из рисунка, такая упрощённая резистивно-ёмкостная модель зерна не согласуется с экспериментом. Наиболее сильное отличие от эксперимента выявляется в частотной зависимости сдвига фазы (ϕ), которая при понижении частоты стремится к нулю. Однако в эксперименте фазовый угол (2) не опускается ниже -30° даже на предельно низких частотах. Такое поведение активной и реактивной компонент импеданса, как правило, наблюдается в некоторых неоднородных по структуре проводящих композитах, ионных соединениях и электролитах. В этих материалах в электрическом поле возникает неравновесное распределение зарядов, которые могут скапливаться вблизи поверхности металлических электродов или на структурных неоднородностях в объёме материала. В результате происходит нарушение однородности внутренних электрических полей и возникает самопроизвольная диффузия зарядов. Такое anomalous поведение импеданса и фазы наблюдается обычно на низких частотах. По-видимому, в увлажнённом зерне в переменном низкочастотном электрическом поле также происходит неравновесное перераспределение зарядов вблизи поверхности и, воз-

можно, во внутренней структуре зерна, что и приводит к экспериментально регистрируемой на рис. 2 дисперсии импеданса и фазы.

В методе импедансной спектроскопии появление неравновесного распределения электрических зарядов во многих образцах хорошо тестируется методом построения годографа импеданса, который представляет собой функциональную зависимость мнимой компоненты импеданса $Z''(\omega)$ от действительной $Z'(\omega)$ компоненты [10]. Для простой однородной RC -модели данного увлажнённого зерна ($R=1,8 \times 10^7$ Ом и $C=6 \times 10^{-13}$ Ф) годограф импеданса имеет форму полуокружности, показанной на рис. 3 пунктирной линией. Отсчёт частоты годографа начинается с правого края (стрелка). Область годографа в начале координат соответствует высоким частотам. Такой вид годографа означает, что действительная и мнимая компоненты импеданса простой параллельной RC -цепи связаны между собой математическим уравнением полуокружности. На этом же рисунке экспериментальными точками обозначен годограф импеданса $Z''(\omega)$ от $Z'(\omega)$ увлажнённого зерна, который имеет вид наклонной линии.

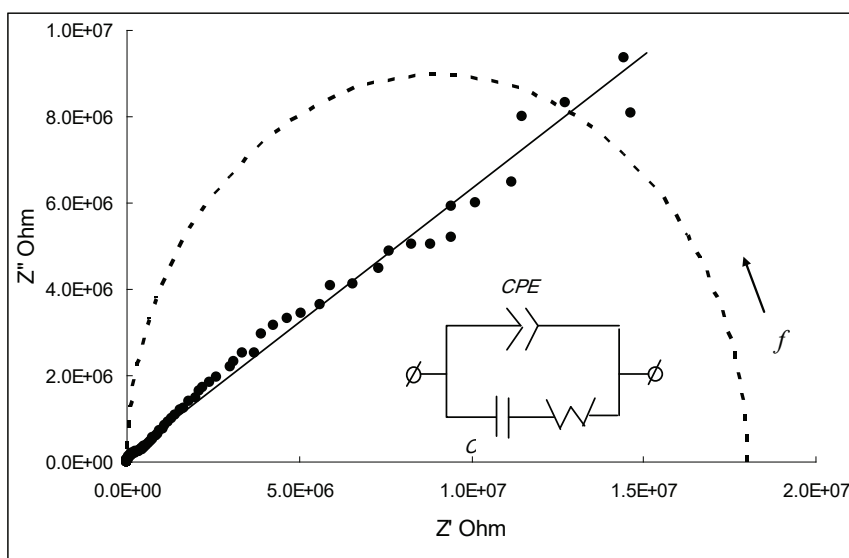


Рис. 3. Годограф импеданса влажного зерна

Fig. 3. Wet grain impedance hodograph

В начале координат на высоких частотах реальная и мнимая компоненты импеданса зерна имеют небольшие значения, но при понижении частоты обе компоненты почти одинаково возрастают. Это ещё раз подтверждает факт, что электрические и диэлектрические характеристики этого образца формируются

более сложным образом, чем радиотехническая модель, состоящая из постоянной ёмкости и параллельно включенного резистора. Сложность возникает в связи с тем, что в процессе протекания переменного электрического тока через внешнюю и внутреннюю структуру зерна образуются области неравно-

весного распределения электрических зарядов не только в приэлектродной области, но, возможно, и во внутренних кластерах зерна. Для радиотехнического моделирования этих процессов в данной работе использовалась специальная программа (Eisa-analyzer) поиска наиболее подходящей эквивалентной электрической схемы, импеданс которой согласуется с экспериментом. Наиболее подходящая для данного зерна эквивалентная схема показана на рис. 3. Схема состоит из трёх параллельно включенных радиоэлементов, обозначенных символами CPE , W и ёмкости C . Элемент CPE в основном используется для моделирования частотно-зависимой ёмкости или сквозного сопротивления, а частотно-зависимый элемент W моделирует процесс накопления электрических зарядов вблизи электродов (двойной электрический слой) и их диффузию в объём материала.

Импеданс частотно-зависимого элемента CPE принято записывать в виде [12]:

$$Z_{CPE}(\omega) = A(j\omega)^\alpha, \quad (4)$$

где ω – угловая частота, коэффициент $A = 2,8 \times 10^{-8}$ для данного образца зерна имеет размерность усреднённой ёмкости, а величина $\alpha = 0,37$ характеризует степень неоднородно-

сти (отклонение от единицы) распределения электрических зарядов по объёму зерна [13].

Диффузионный импеданс Варбурга (W) [14–15] представляет собой последовательно соединённую частотно-зависимую ёмкость C_w и сопротивление R_w :

$$C_W(\omega) = \frac{1}{W\sqrt{\omega}}; R_W(\omega) = \frac{W}{\sqrt{\omega}}; \quad (5)$$

где W – постоянная Варбурга, которая определяется следующим соотношением:

$$W(\omega) = \frac{RTN_A}{F^2 S_n \sqrt{D}}; \quad (6)$$

где R – газовая постоянная; N_A – постоянная Авогадро; F – постоянная Фарадея; S – геометрический фактор (площадь пластин измерительной ячейки).

Именно эти частотно-зависимые процессы и формируют измеряемый в данном эксперименте наклонный луч годографа импеданса практически во всём диапазоне частот.

На рис. 4 приведены рассчитанные из соотношений (2) частотные зависимости действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости (1, 2) и удельной проводимости (3, 4) для этого образца зерна.

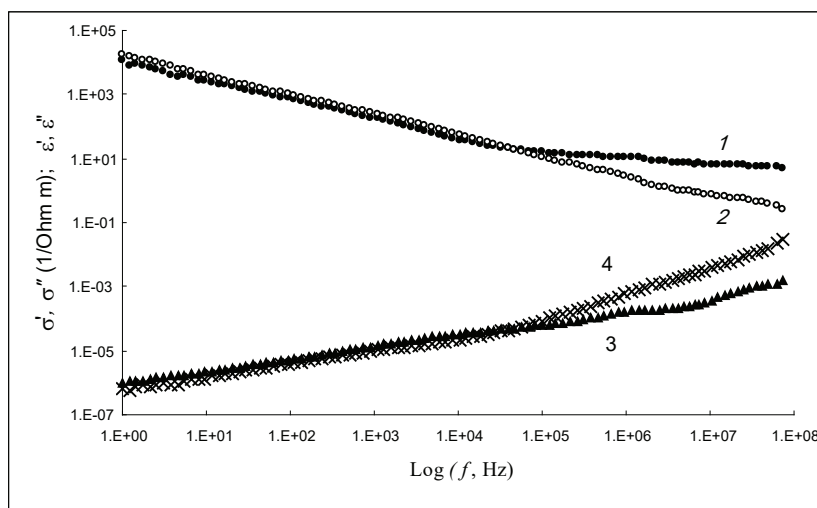


Рис. 4. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' (1), ϵ'' (2), и удельной проводимости σ' (3), σ'' (4) увлажнённого зерна

Fig. 4. Frequency dependence of the permittivity ϵ' (1), ϵ'' (2), and specific conductivity σ' (3), σ'' (4) of moistened grain

Как видно, на низких частотах $f \approx 1$ Гц действительная компонента ДП (1) данного образца достигает огромных значений $\epsilon' \approx 1 \times 10^4$, что можно объяснить образованием двойного электрического слоя вблизи поверхности электродов, который экранирует внеш-

нее электрическое поле в объёме зерна. Это и воспринимается как сильное увеличение действительной и мнимой компонент ДП. Не исключено, что неравновесное скопление зарядов может произойти не только в приэлек-

тродном пространстве, но и во внутренних структурах зерна.

Двойной электрический слой препятствует переносу электрических зарядов во внешнюю цепь, поэтому удельная активная и реактивная проводимость зерна на низких частотах мала и находится в пределах $\sigma' = 1 \times 10^{-7}$ и $\sigma'' = 6,9 \times 10^{-7}$ (Ом · м⁻¹). При возрастании частоты двойной электрический слой не успевает формироваться, поэтому действительная и мнимая компоненты проводимости возрастают, но ДП зерна уменьшается вплоть

до стационарных значений ($\epsilon' \approx 5,2 - 5,4$) на высоких частотах. Согласно данным Д.А. Будникова, А.А. Цымбел [16], такая величина ДП на частоте $\sim 10^8$ Гц приблизительно соответствует влажности зерна 20 – 25%.

Для этого увлажнённого зерна на рис. 5 также приведена частотная зависимость тангенса угла потерь, которая на низких частотах достигает высоких значений $\text{tg } \delta \sim (1,5 - 2,0)$, но с ростом частоты немонотонно снижается до $\text{tg } \delta \sim 0,05$.

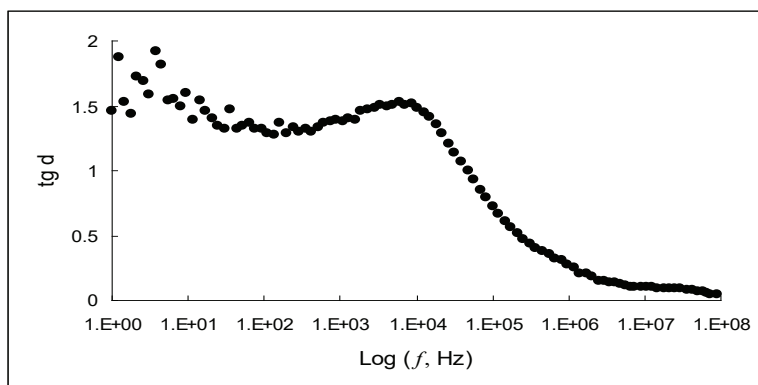


Рис. 5. Частотная зависимость тангенса угла потерь увлажнённого зерна

Fig. 5. Frequency dependence of the loss tangent of the moistened grain

Хорошо видно, что вблизи частоты $f \approx 10^4$ Гц выявляется релаксационный максимум, а затем происходит быстрое снижение диэлектрических потерь, так как на высоких частотах преобладает реактивный $\sigma''(f)$ тип проводимости. По-видимому, растворённые в воде ионы зерна или заряженные молекулярные комплексы обладают малой подвижностью и в высокочастотном электрическом поле ис-

пытывают лишь ограниченное смещение, сопровождающееся высокочастотной поляризацией.

В данной работе были также измерены увлажнённые зёрна пшеницы с добавлением в воду небольшого количества поваренной соли ($\sim 0,1\%$ по массе). Измеренный спектр импеданса (Z) такого зерна и фазы (φ) приведены на рис. 6.

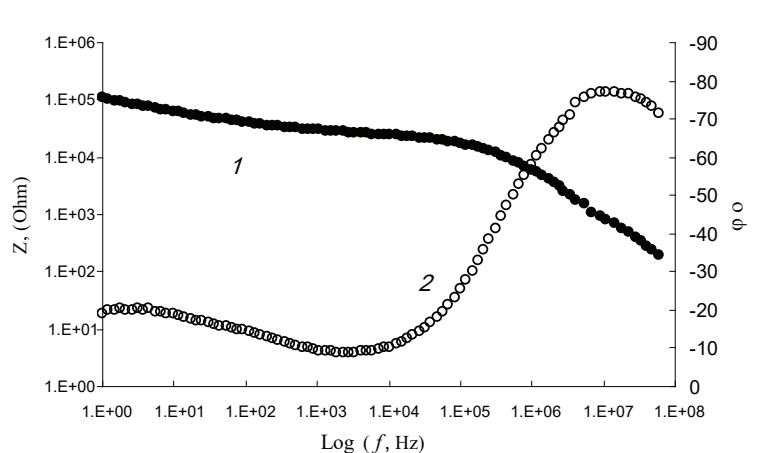


Рис. 6. Частотная зависимость модуля импеданса Z (1) и фазы φ (2) зерна замоченного в воде с добавлением соли

Fig. 6. Frequency dependence of the impedance modulus Z (1) and phase φ (2) grain soaked in water with the addition of salt

Как видно, частотная зависимость импеданса $\text{Log}(Z, \text{Ом})$ лишь в деталях отличается от вымоченного в чистой воде зерна. В частности, в этом образце довольно сильно уменьшается модуль импеданса в области низких частот, что связано с увеличением concentra-

ции ионов соли и возрастанием ионной проводимости. Из-за повышенной проводимости на высоких частотах фазовый угол (ϕ) не достигает -90° . На рис. 7 приведен годограф импеданса этого образца и подобранная эквивалентная электрическая схема.

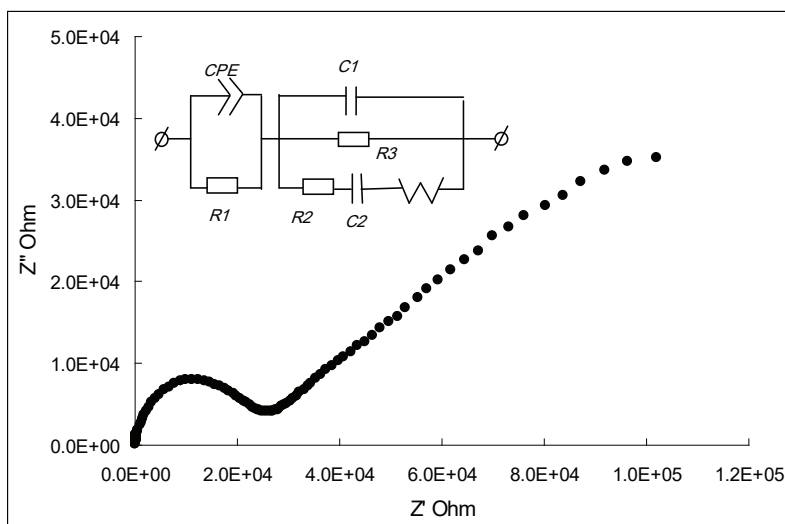


Рис. 7. Годограф импеданса солевого раствора влажного зерна

Fig. 7. Impedance hodograph of a saline solution of wet grain

В отличие от предыдущего образца зерна данная эквивалентная схема состоит из двух звеньев, одно из которых моделирует высокочастотную полуокружность с сопротивлением $R_1 = 19840$ и реактивным элементом емкости CPE с коэффициентом $A = 2,17 \cdot 10^{-10}$ и показателем степени $\alpha = 0,86$. В области низких частот возникает почти прямолинейный луч годографа как и для предыдущего образца. Этот луч моделируется импедансом Варбурга $W = 3,8 \times 10^5$ и целой совокупностью дополнительных RC -элементов. Видно, что в этой схеме присутствует сквозное сопротивление $R_3 = 97 \text{ Ом}$, которое в сумме с сопротивлением R_1 определяет сквозную омическую проводимость данного зерна на постоянном токе.

ВЫВОДЫ

1. Полученные в работе результаты по изучению электрофизических свойств увлажнённого зерна методом импедансной спектроскопии позволили выделить область радиоча-

стот, где проявляются специфические процессы электрической поляризации и проводимости, связанные со сложной поверхностной и объёмной структурой зерна. В области низких частот выявлены процессы накопления объёмных зарядов вблизи электродов и, вероятно, на внутренних структурах зерна.

2. Основным этапом анализа резистивно-емкостных характеристик зерна являлось сопоставление импедансных спектров с аналогичными спектрами эквивалентных электрических схем, каждый элемент которых косвенно связывался с определёнными процессами электрической поляризации и движением электрических зарядов. Установлено, что металлические контакты на поверхности зерна не являются полностью блокирующими по постоянному и низкочастотному току.

3. Показано, что дисперсия комплексной ДП и удельной проводимости зерна существенно зависит от количества влаги на поверхности и во внутренних структурах зерна, а также от наличия дополнительных ионов в водном растворе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манасян С.К. Принципы конвективной сушки зерна // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 6. – С. 145–150.

2. Цугленок Н.В., Манасян С.К., Демский Н.В. Зерносушилки сельскохозяйственного назначения // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 11. – С. 47.
3. Булгаков Р.А., Барышева Н.Н. Обзор электрофизических свойств семян пшеницы и их применение в методах контроля // Ползуновский альманах. – 2018. – № 4. – С. 205–207.
4. Будников Д.А. Результаты экспериментальных исследований фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 3(43). – С. 16–21.
5. Бузунова М.Ю. Анализ электрофизических характеристик зерновых культур // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы устойчивого развития агропромышленного комплекса», посвященной памяти А.А. Ежевского (15-16 ноября 2018 г.). – Иркутск: Изд-во Иркут. ГАУ, 2018. – С. 166–173.
6. Belyaev B.A., Drokin N.A. Impedance spectroscopy investigation of electrophysical characteristics of the electrode-liquid crystal interface // *Physics of the Solid State*. – 2015. – Т. 57, N 1. – P. 181–187.
7. Markevich I.A., Selyutin G.E., Drokin N.A. Impedance Spectroscopy Study of a Polymer Composite with Carbon Nanotubes in Contact with an Electrolyte // *Technical Physics*. – 2019. – Vol. 64, N 9. – P. 1324–1329.
8. Гираев М.А. Частотный спектр импеданса биотканей растительного происхождения // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. – 2015. – Т. 30, №6. – С. 50–55.
9. Эквивалентные электрические модели биологических объектов / А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов, А.И. Судаков [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 1. – С. 110–120.
10. *Electrical impedance spectroscopy study of biological tissues* / D.A. Deana, T. Ramanathand, D. Machadoa [et al.] // *Journal of Electrostatics*. –2008. –Vol. 66. – P. 165–177.
11. *Lvovich Vadim F. Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*. – New Jersey: Wiley&Sons, 2012. – 368 p.
12. Букун Н.Г., Укше А.Е. Импеданс твердоэлектролитных систем // *Электрохимия*. – 2009. – Т. 45, № 1. – С. 13–27.
13. *Impedance of constant phase element (CPE)-blocked diffusion in film electrodes* / J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, P. Bueno [et al.] // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 1998. –Vol. 452(2). – P. 229–234.
14. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические процессы в переменном токе // *Успехи химии*. – 1975. – Т. 44, № 11. – С. 1979–1986.
15. *Электрохимический импеданс: монография* / З.Б. Стойнов [и др.]; АН ССР, Ин-т электрохимии им. А.Н. Фрумкина. – М.: Наука, 1991. – 335 с.
16. Будников Д.А., Цымбал А.А. Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов // *Инновации в сельском хозяйстве*. – 2016. – № 3(18). – С. 154–159.

REFERENCES

1. Manasjan S.K., *Vestnik KrasGAU*, 2008, No. 6, pp. 145–150. (In Russ.)
2. Cuglenok N.V., Manasjan S.K., Demskij N.V., *Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija*, 2012, No. 11, p. 47. (In Russ.)
3. Bulgakov R.A., Barysheva N.N., *Polzunovskij al'manah*, 2018, No. 4, pp. 205–207. (In Russ.)
4. Budnikov D.A., *Vestnik agrarnoj nauki Dona*, 2018, No. 3(43), pp. 16–21. (In Russ.)
5. Buzunova M.U., *Problemy i perspektivy ustojchivogo razvitija agropro-myshlennogo kompleksa* (Problems and prospects of sustainable development of the agro-industrial complex), Proceedings of the All-Russian scientific and Practical conference with international participation dedicated to the memory of A.A. Yezhevsky, Irkutsk: Irkutskij GAU Publ, 2018, pp. 166–173. (In Russ.)
6. Belyaev B.A., Drokin N.A., Impedance spectroscopy investigation of electrophysical characteristics of the electrode-liquid crystal interface, *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57, No. 1, pp. 181–187.

7. Markevich I.A., Selyutin G.E., Drokin N.A., Impedance Spectroscopy Study of a Polymer Composite with Carbon Nanotubes in Contact with an Electrolyte, *Technical Physics*, 2019, Vol. 64, No. 9, pp. 1324–1329.
8. Giraev M.A., *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennye nauki*, 2015, Vol. 30, No. 6, pp. 50–55. (In Russ.)
9. Zuev A.L., Mishlanov V.Ju., Sudakov A.I., Shakirov N.V., Frolov A.V., *Rossiiskij zhurnal biomehaniki*, 2012, Vol. 16, No. 1, pp. 110–120. (In Russ.)
10. Deana D.A., Ramanathand T, Machadoa D. [et al.], Electrical impedance spectroscopy study of biological tissues, *Journal of Electrostatics*, 2008, Vol. 66, pp. 165–177.
11. Lvovich Vadim F., *Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*, New Jersey: Wiley&Sons, 2012, 368 p.
12. Bukun N.G., Ukshe A.E., *Elektrokhimiya*, 2009, Vol. 45(1), pp. 11–24. (In Russ.)
13. Bisquert J, Garcia-Belmonte G, Bueno P, Longo E, Bulhoes L., Impedance of constant phase element (CPE)-blocked diffusion in film electrodes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1998, Vol. 452 (2), pp. 229–234.
14. Grafov B.M., Ukshe E.A., *Uspekhi khimii*, 1975, Vol. 44, No. 11, pp. 933–937. (In Russ.)
15. Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova-Stoynova B., Elkin V.V., *Elektrokhimicheskiy impedans (Electrochemical impedance)*, Moscow: Nauka Publ, 1991, 335 p.
16. Budnikov D.A., Tsymbal A.A., *Innovatsii v selskom khozyaystve*, 2016, No. 3 (18), pp. 154–159. (In Russ.)