

УДК 632.08:633.11

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА УВЛАЖНЕННЫХ ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ

¹Чжан А.В., ²Дрокин Н.А., ³Ничкова Н.М., ³Мороз Ж.М.

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск;

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

³Иркутский государственный университет путей сообщения,

Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, e-mail: avchz@mail.ru

Целью работы является определение особенностей спектральных характеристик электрического импеданса зерен пшеницы. Исследованы электрофизические свойства цельных спрессованных, а также размолотых образцов зёрен пшеницы с различной влажностью в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц. Исходная партия зерен предварительно высушивалась в нагревательном шкафу при температуре 60 °С и затем насыщалась влагой в паровой бане при той же температуре. Влажность оценивалась по разнице веса между исходным и подвергнутым воздействию образцами (сушке или увлажнению). Исследовались образцы двух типов, отличающихся способом подготовки и структурой. Образцы первого типа состояли из цельных зерен, которые помещались в пресс-форму и подвергались всестороннему сжатию небольшим давлением, что исключало наличие воздушных промежутков между зёрнами. В образцах второго типа зёрна предварительно размалывались в ступе и затем в виде порошка помещались в измерительную ячейку. Измерительная ячейка с образцом при комнатной температуре подключалась к анализаторам спектров Elins 1500J и Agilent E5061B, которые позволяют получать частотные зависимости импеданса и фазы. Согласно полученным данным, область низких частот (до 10 кГц) характеризуется преобладающим влиянием активной составляющей полного сопротивления, в то время как выше этой частоты преобладает реактивная часть. Выявлены процессы накопления электрических зарядов у поверхности металлических электродов, которые экранируют внешнее электрическое поле и приводят к аномальному увеличению диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в области низких частот. Полученные спектры сопоставлялись со спектрами наиболее подходящих эквивалентных электрических схем, радиотехнические компоненты которых помогают понять основные механизмы прохождения переменного электрического тока через неоднородную структуру зерна.

Ключевые слова: биологические ткани, зерно, пшеница, импеданс, проводимость, диэлектрическая проницаемость

FEATURES OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL IMPEDANCE OF WETTED WHEAT GRAINS

¹Chzhan A.V., ²Drokin N.A., ³Nichkova N.M., ³Moroz Zh.M.

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk;

²Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, L.V. Kirensky SB RAS, Krasnoyarsk;

³Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk,
e-mail: avchz@mail.ru

The aim of this work is to determine the features of the spectral characteristics of the electrical impedance of wheat grains. The electrophysical properties of whole pressed and ground samples of wheat grains with different moisture content in the frequency range from 1 Hz to 100 MHz have been studied. The initial batch of grains was preliminarily dried in a heating cabinet at a temperature of 60°C and then saturated with moisture in a steam bath at the same temperature. Moisture was estimated from the difference in weight between the original and exposed samples (drying or wetting). Samples of two types were studied, differing in the method of preparation and structure. Samples of the first type consisted of whole grains, which were placed in a mold and subjected to all-round compression by a small pressure, which excluded the presence of air gaps between the grains. In samples of the second type, the grains were preliminarily ground in a mortar and then placed in the form of a powder into a measuring cell. The measuring cell with the sample at room temperature was connected to the Elins 1500J and Agilent E5061B spectrum analyzers, which make it possible to obtain the frequency dependences of the impedance and phase. According to the data obtained, the low-frequency region (up to 10 kHz) is characterized by the predominant influence of the active component of the impedance, while above this frequency, the reactive part predominates. The processes of accumulation of electric charges near the surface of metal electrodes, which shield the external electric field and lead to an anomalous increase in the permittivity and loss tangent in the low-frequency region are revealed. The obtained spectra were compared with the spectra of the most suitable equivalent electrical circuits, the radio engineering components of which help to understand the main mechanisms of the passage of an alternating electric current through a heterogeneous grain structure.

Keywords: biological tissues, grain, wheat, impedance, conductivity, dielectric constant

Вопросы контроля качества зерна всегда остаются актуальными, так как зерновые культуры и, в частности, пшеница, являются одной из важных составляющих питания человека.

В настоящей работе представлены результаты исследования электрических характеристик увлажнённых зёрен пшеницы методом импедансной спектроскопии (ИС)

или регистрации комплексного электрического сопротивления в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц. Этот метод к настоящему времени находит широкое применение для изучения процессов и свойств различных материалов в фундаментальных и прикладных исследованиях. Это особенно заметно в таких областях, как биология и медицина, что связано с тем, что целостность плазматических мембран популяции, объем клеток, внутриклеточная и внеклеточная проводимость влияют на спектр импеданса. Биологические организмы и составляющие их органы, ткани и клетки обладают уникальными свойствами электрического сопротивления, что, в частности, позволяет дифференцировать нормальные и злокачественные ткани в различных органах, указывать на начало и прогрессирование болезненных состояний. Измерения импеданса используются для определения состава и индекса массы тела человека [1], при мониторинге функции легких и сердца для оценки состояния тканей животных.

Применения ИС в области растительных культур не так заметны, и к настоящему времени имеются только предварительные сведения об использовании ИС для анализа отдельных видов растений [2–4]. Здесь можно выделить несколько причин, которые препятствуют широкому применению метода для контроля качества сельхозпродуктов.

Во-первых, в этой области, как отмечалось выше, традиционно применяются методики, основанные на измерении ДП. Такие методы хорошо отработаны теоретически и практически, и к настоящему времени установлены частотные характеристики ϵ для основных сельскохозяйственных культур [5–8] (вплоть до десятков ГГц).

Во-вторых, в силу того, что в импедансной методике требуется определение нескольких физических параметров, такая методика более требовательна к аппаратному обеспечению по сравнению диэлектрической, хотя эти методы во многом схожи. В диэлектрическом методе измерения обычно производятся в высокочастотной области (от 100 МГц до 10 ГГц), в то время как импедансные измерения могут производиться при более низких частотах (вплоть до единиц Гц). К настоящему времени ограничения, связанные с приборной частью, во многом сняты, что связано с появлением высокочувствительных анализаторов импеданса, работающих в широкой области ча-

стот. Так как частотная область, в которой проявляется релаксация, связанная с поглощением клеточными структурами, составляет приблизительно 100 Гц – 10 МГц [3], то использование метода ИС для исследований растительных тканей является очень привлекательным.

Сущность метода ИС состоит в подаче возмущающего синусоидального сигнала малой амплитуды на исследуемую систему и изучении вызванного им сигнала-отклика на выходе. Если в качестве воздействующего сигнала на входе использовать напряжение $V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t)$ накладываемое на систему, а сигнал на выходе фиксировать как ток $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ протекающий через систему, где V_0 и I_0 – амплитуды напряжения и тока, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, φ – фазовый сдвиг, тогда импеданс $Z^*(\omega)$ определяется соотношением

$$Z^*(\omega) = V(\omega) / I(\omega). \quad (1)$$

Обычным средством отображения частотных свойств импеданса могут служить дисперсионная зависимость полного сопротивления $|Z|$ и угла фазового сдвига от частоты ω . Несомненным достоинством метода ИС является возможность выделения сигналов, связанных как с реактивной, так и активной составляющими импеданса, что позволяет получить дополнительную информацию об электрических процессах в материалах самой разной природы.

Целью исследования является определение особенностей спектральных характеристик электрического импеданса зерен пшеницы.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов для исследований использовались зёрна, насыщенные влагой. Цельные зерна помещались в пресс-форму и подвергались всестороннему сжатию небольшим давлением, что исключало наличие воздушных промежутков между зёрнами. Насыщение влагой производилось в паровой бане при температуре 60 °С. Кроме таких образцов исследовались образцы в виде порошка из размолотых в ступе зерен, которые насыщались влагой и помещались в измерительную ячейку.

Серьёзной проблемой при измерениях импеданса является выбор подходящего материала для электродов измерительной ячейки. Электроды должны обеспечивать надёжный контакт с образцом и обладать минимальным переходным сопротивлени-

ем. В данном эксперименте использовались электроды из тонкой алюминиевой фольги или тонко раскатанного индия, которые прижимались к прессованному образцу зерна с помощью миниатюрной струбицы. Предварительные испытания этих контактов показали практически одинаковые частотные зависимости импеданса исследованных образцов.

Измерительная ячейка с образцом при комнатной температуре подключалась к анализаторам спектров Elinx 1500J и Agilent E5061B, которые позволяют получать частотные зависимости импеданса и фазы в диапазоне от 1 Гц до 100 МГц. Относительная погрешность измерений импеданса находилась в пределах 3–5%. Все измерения производились при комнатной температуре.

Результаты исследования и их обсуждение

Как показано на рис. 1, в частотном изменении комплексного сопротивления увлажненных спрессованных зерен можно выделить две области, отличающиеся временами релаксации. Наблюдаемый излом $\text{Log } Z$ на частоте выше f_0 , значение которой составляет 10–15 кГц, указывает на различный характер проводимости соответственно ниже и выше этой частоты. Изменение комплексного сопротивления в низкочастотной и высокочастотной областях спектра $\text{Log } Z$ на рис. 1 обозначено пунктирами.

Значения фазового угла ϕ при самых низких частотах лежат в пределах 30–35°.

Это означает, что в низкочастотной области имеет место как активная, так и реактивная часть импеданса. Здесь имеет место как сквозной электрический ток, так и токи смещения.

С повышением частоты в комплексном сопротивлении преобладает реактивная составляющая, на это указывает значение фазы выходного сигнала, которая с повышением частоты превышает 45°. При этом модуль импеданса $|Z|$ достигает величины 10^8 Ом на низких частотах и с ростом частоты до 100 МГц снижается до 10^2 Ом. Как следует из рис. 1, с повышением частоты выше f_0 значение фазового угла увеличивается и стремится к -90° при $f > 100$ МГц.

В эквивалентной RC-цепи, которая составлена из параллельно включенных активного сопротивления и емкости, при понижении частоты фазовый угол должен стремиться к нулю при уменьшении частоты до нуля (кривая фазового сдвига эквивалентной цепи показаны на рисунке 1 штриховыми линиями). Наблюдаемое отличие истинного изменения фазы и эквивалентной цепи указывает на то, что даже на очень низких частотах во влажных зернах присутствует значительная емкостная проводимость. Это означает, что во влажном зерне под действием электрического поля возникают процессы, которые приводят к скоплению зарядов вблизи поверхности электродов или в объеме материала и образованию двойного электрического слоя [9].

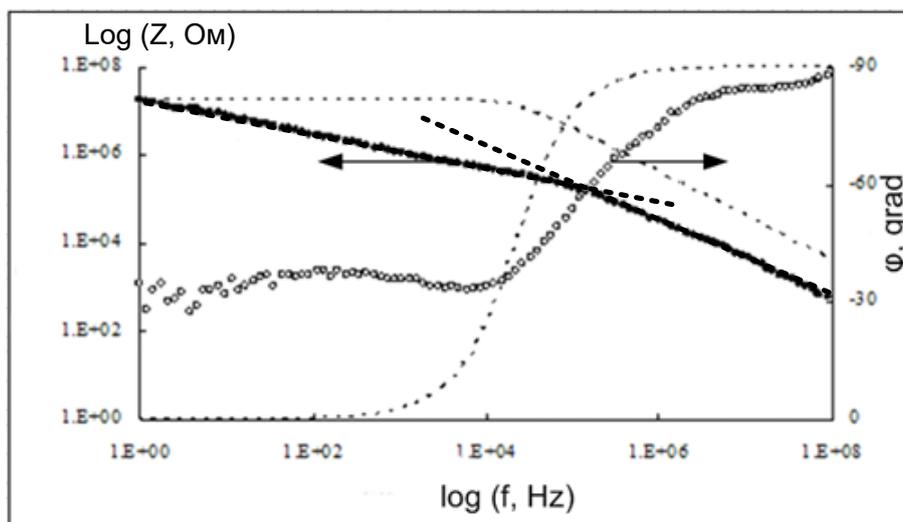


Рис. 1. Частотная зависимость логарифма модуля импеданса Z и фазы ϕ спрессованных увлажненных зерен. Пунктир – расчётные кривые импеданса и фазы эквивалентной параллельной RC-цепи с $C = 6 \cdot 10^{-13}$ и $R = 1.8 \cdot 10^7$ Ом

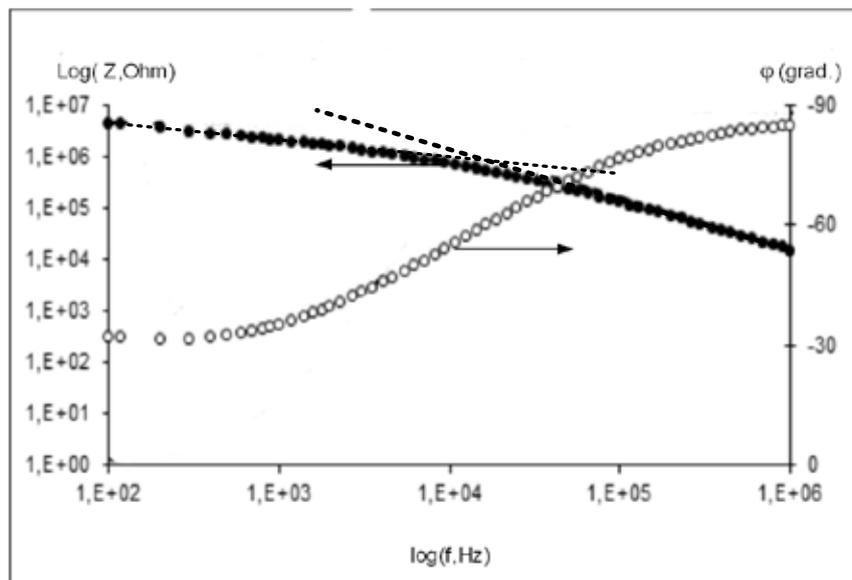


Рис. 2. Частотная зависимость модуля импеданса Z и фазы ϕ увлажненных размолотых зерен

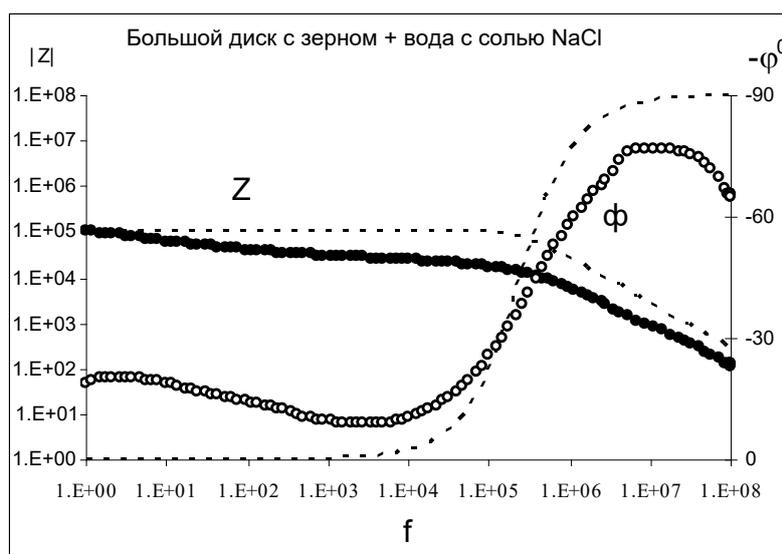


Рис. 3. Частотная зависимость модуля импеданса Z (1) и фазы ϕ (2) замоченного в воде зерна с добавлением соли

Во многом повторяющиеся особенности в частотных зависимостях импеданса и фазы наблюдаются в размолотых зернах, которые не подвергались прессованию. Как следует из рис. 2, в частотной зависимости импеданса таких образцов также можно выделить две области, которые отличаются характером проводимости, так же как в спрессованных зернах. Это свидетельствует о том, что изменения импедансных величин увлажненных зерен в основном

связаны с внутренней структурой зерна, а изменения на границах между зернами, связанные с подготовкой образцов, не оказывают на импедансные характеристики значительного влияния.

В работе были также измерены увлажнённые зёрна пшеницы с добавлением в воду небольшого количества обычной поваренной соли ($\sim 0,1\%$ по весу), которая имитировала засоленную почву при выращивании зерна. На рис. 3 приведены частот-

ные зависимости импеданса и угол сдвига фазы между током и напряжением для этого образца.

Как видно, в общих чертах частотная зависимость импеданса лишь в деталях отличается от вымоченного зерна в чистой воде. В частности, в этом образце довольно сильно уменьшается величина импеданса в области низких частот, а на высокой частоте фазовый угол (φ) не достигает -90° . Это может быть обусловлено релаксационными процессами из-за запаздывания поляризации зерна при быстром изменении направления электрического поля.

Из приведенных частотных зависимостей модуля импеданса и фазы увлажненных зерен можно сделать вывод, что представление данных объектов с помощью эквивалентных схем из проводящих и емкостных элементов допустимо лишь в некотором приближении. Биологические тела можно рассматривать как электрические цепи, состоящие из ряда пространственно распределенных элементов, обладающих проводниковыми и диэлектрическими свойствами. Но, в отличие от твердых проводников, электрическая проводимость в биологических тканях в основном осуществляется за счет движения ионов в водной среде, ограниченной биологическими тканями. Поэтому при протекании переменного тока электропроводность будет зависеть не только от активной составляющей, но реактивной, которая, в свою очередь, будет зависеть от структуры биоткани, которая включает в себя интерфейс, ограничивающий клетку от внеклеточной жидкости, а также сложную внутриклеточную структуру. Все это обуславливает специфические диэлектрические и импедансные свойства биологических тел. Согласно имеющимся данным [1, 3], в биологических объектах как растительного, так и животного происхождения проводимость на низких частотах в основном осуществляется по внеклеточной области, на высоких частотах ток течет преимущественно через клетку. Это объясняет излом частотной зависимости модуля импеданса увлажненных зерен, его наличие может быть связано с указанными особенностями протекания переменного электрического тока по внутриклеточной и внеклеточной областям.

В заключение отметим, что метод ИС дает дополнительные возможности для вы-

яснения протекающих электрических процессов в зернах, что может быть использовано для контроля качества таких объектов.

Выводы

1. Установлено, что в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц в дисперсионной зависимости комплексного электрического сопротивления и тангенса угла потерь увлажненных зерен пшеницы имеются две релаксационные области, которые отличаются преобладающим вкладом активной и реактивной частей в комплексное сопротивление в низкочастотной и высокочастотной областях спектра.

2. Установлены процессы накопления электрических зарядов у поверхности металлических электродов, которые экранируют внешнее электрическое поле с образованием двойного электрического слоя.

3. Произведено сопоставление полученных спектров импеданса со спектрами наиболее подходящих эквивалентных электрических схем, радиотехнические компоненты которых помогают понять основные механизмы прохождения переменного электрического тока через сложную неоднородную структуру зерна.

Список литературы

1. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392 с.
2. Голев И.М., Лесникова Э.П., Бобкина Е.Ю. Исследование плодоовощной продукции методом импедансной спектроскопии // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 12. С. 31–34.
3. Yasumasa Ando, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying. *Journal of Food Engineering*. 2014. V. 121. P. 24–31.
4. Гираев М.А. Частотный спектр импеданса биотканей растительного происхождения // Вестник Дагестанского государственного университета. 2015. Т. 30. № 6. С. 50–55.
5. David B Funk, Zoltan Gillay, Peter Meszaros. Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Measurement Science and Technology*. 2007. Vol. 18. No. 4. P.1004–1015. DOI: 10.1088/0957-0233/18/4/007.
6. Nelson S.O., Trabelsi S. Use of material dielectric properties for agricultural applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2016. Vol. 50 (4). P. 237–268. DOI: 10.1080/08327823.2016.1247235.
7. Stuart O. Nelson. Dielectric Properties of Agricultural Materials and their Applications. Chapter 11 Dielectric Properties of Selected Food Materials // Academic Press. 2015. P. 147–165.
8. Richard Torrealba-Meléndez, María Elena Sosa-Morales, José Luis Olvera-Cervantes, Alonso Corona-Chávez. Dielectric properties of cereals at frequencies useful for processes with microwave heating. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. No. 52 (12). P. 8403–8409.
9. Салем Р.Р. Теория двойного слоя. М.: Физматлит, 2003. 104 с.