

**ОТЛИЧИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ИМПЕДАНСНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРЕН ПШЕНИЦЫ, УВЛАЖНЕННЫХ
РАСТВОРАМИ KCl и NaCl**

А.В. Чжан, д. физ.-мат. н., ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, Россия
e-mail: avchz@mail.ru

Н.А. Дрокин, д. физ.-мат. н., Институт физики имени Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: drokin@iph.krasn.ru

Н.М. Ничкова, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Красноярск, Россия
e-mail: nichkova_nm@krsk.irkups.ru

Ж.М. Мороз, к. физ.-мат. н., Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Красноярск, Россия
e-mail: moroz_jm@krsk.irkups.ru

Аннотация. В статье описываются результаты исследования электрических свойств цельных зёрен пшеницы, насыщенных 9% растворами NaCl и KCl, в диапазоне частот от единиц Гц до 100 МГц. Показаны отличия в частотных зависимостях диэлектрической проницаемости, тангенса диэлектрических потерь, а также электрического импеданса зерен пшеницы при наличии ионов калия и натрия.

Ключевые слова: электрический импеданс, диэлектрическая проницаемость, зерно, пшеница, ионы калия, ионы натрия

**DIFFERENCE OF DIELECTRIC AND IMPEDANCE
CHARACTERISTICS OF WHEAT GRAINS MOISTENED WITH KCl
AND NaCl SOLUTIONS**

A.V. Chzhan, doctor of Physics and Mathematics Sciences, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
e-mail: avchz@mail.ru

N.A. Drokin, doctor of Physics and Mathematics Sciences, Institute of Physics,
Russian Academy of Sciences, L.V. Kirensky SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
drokin@iph.krasn.ru

N.M. Nichkova, Irkutsk State Transport University. Krasnoyarsk Institute of
Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia
nichkova_nm@krsk.irkups.ru

Zh.M. Moroz, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Irkutsk State
Transport University. Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk,
Russia
moroz_jm@krsk.irkups.ru

Abstract. The article describes the results of the research of the electrical properties of whole wheat grains saturated with 9% NaCl and KCl solutions in the frequency range from units of Hz to 100 MHz. Differences in the frequency dependences of the dielectric permittivity, the tangent of dielectric losses, as well as the electrical impedance of wheat grains in the presence of potassium and sodium ions are shown.

Key words: electrical impedance, permittivity, grain, wheat, potassium ions, sodium ions

Введение

В настоящее время российский и зарубежный рынки предлагают различные технические средства косвенного контроля качества зерна, которые основаны на измерениях электрических свойств семян, электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости [1,2]. Вместе с тем остаются вопросы, связанные с точностью реально измеряемых параметров зерна, так как необходимо учесть то, что присутствие различных ионов, в основном K, Na и Cl, может сказаться на электрических характеристиках.

В настоящей работе исследованы электрические свойства цельных зёрен пшеницы, в диапазоне частот от единиц Гц до 100 МГц. Исходная партия зерен предварительно высушивалась при комнатной температуре и затем насыщалась 9% растворами NaCl и KCl. Измерительная ячейка с

образцом при комнатной температуре подключалась к анализаторам спектров Elins 1500J и Agilent E5061B, которые позволяют получать частотные зависимости импеданса и тангенса диэлектрических потерь. Показаны отличия в частотных зависимостях диэлектрической проницаемости, тангенса диэлектрических потерь, а также электрического импеданса зерен пшеницы при наличии ионов калия и натрия.

Полученные данные могут иметь значение при конструировании различных приборов для тестирования качества зерна и содержания влаги в нем.

Методы исследований

В качестве объектов исследований выбраны зерна пшеницы, которые предварительно высушивались, а затем выдерживались в 9% растворах соли NaCl и KCl. Для этого зерна помещались в герметичную емкость между двумя слоями марли, увлажненными в растворах солей. В таком состоянии они выдерживались от 1 до 2 суток. Кювета с образцами и подведенными к ней электрическими контактами была также герметично закрыта. Для количественного сравнения величины электрического сопротивления в каждом случае выбирались одинаковые по объему зерна, в кювету их помещалось 12 шт.

Для оценки тепловых потерь в диэлектрике используется величина $\operatorname{tg}\delta$, где δ есть угол, который дополняет сдвиг фазы φ между током и напряжением емкостной цепи до 90° . Значение $\operatorname{tg}\delta = P_a/P_r$, где P_a – активная, P_r – реактивная части общей мощности электромагнитного поля. В случае идеального диэлектрика $P_a = 0$, Ток в такой цепи опережает напряжение на 90° , и $\delta = 0$. Чем больше потери, тем больше угол диэлектрических потерь и его функция $\operatorname{tg}\delta$. Коэффициент тепловых потерь можно выразить через:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{z'}{z''}, \quad (1)$$

где ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной величины диэлектрической проницаемости, z' и z'' – действительная и мнимая части

комплексного электрического сопротивления. Для определения диэлектрической проницаемости, комплексного электрического сопротивления использовались анализаторы спектров Elins 1500J и Agilent E5061B в диапазоне от 1 Гц до 100 МГц [3,4]. Измерения проведены в Институте физики СО РАН им. Л.В. Киренского.

Результаты исследований

Диэлектрическая проницаемость зерен пшеницы в значительной мере зависит от частоты электрического поля. Как показано на рисунке 1, на частоте 5 Гц эффективное значение ε' для образца с NaCl достигает $\sim 10^7$ и 10^5 с KCl. С повышением частоты значение ε' снижается и на частоте 100 МГц для образца с NaCl составляет 24,15, с KCl - 7,9.

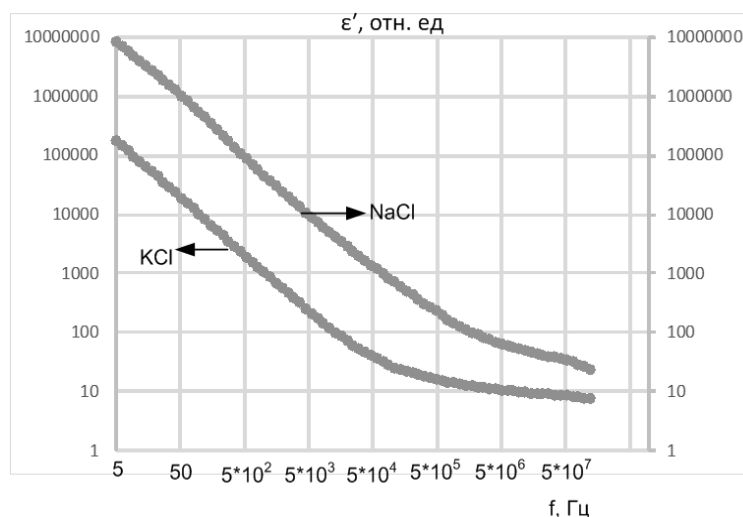


Рисунок 1. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости зерен пшеницы, вымоченных в растворах NaCl и KCl. Время выдержки 1 сутки.

На рисунке 2 показана частотная зависимость активной части комплексного сопротивления зерен пшеницы, вымоченных в растворах NaCl и KCl после выдержки в течении 1 суток.

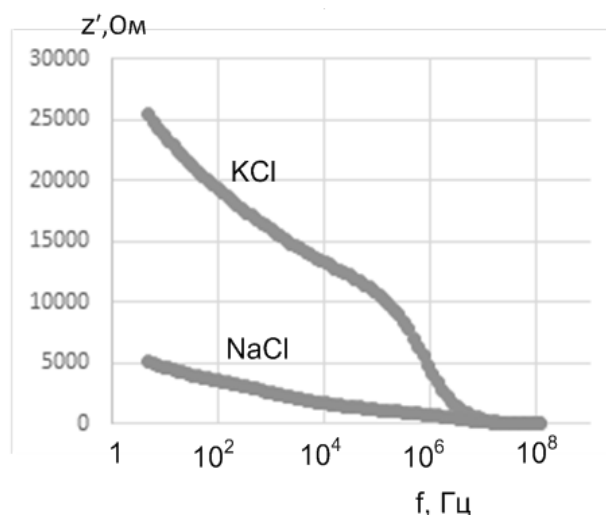


Рисунок 2. Зависимость активной части комплексного сопротивления от частоты электрического поля зерен пшеницы, вымоченных в растворе NaCl и KCl. Время выдержки 1 сутки.

В области низких частот активное сопротивление z' зерен с KCl превышает величину активного сопротивления в образцах с NaCl примерно в 5 раз (на частоте 5 Гц z' оно составляло 25 кОм и 5 кОм в первом и во втором случаях соответственно). С повышением частоты разница в сопротивлениях уменьшается и на частоте ~ 50 мГц значения z' для обоих образцов выравниваются, затем наблюдается обратный эффект: сопротивление зерен с NaCl становится выше, чем у зерен с KCl.

На рисунке 3(а) приведены изменения коэффициента диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от частоты электрического поля зерен, увлажненных в растворах NaCl и KCl в течении суток. Как следует из приведенных графиков, для зерен, увлажненных в растворе NaCl наблюдаются максимумы диэлектрических потерь в двух частотных диапазонах. Первая область находится в районе 100 Гц, вторая расположена выше 10 кГц. Для зерен, вымоченных в растворах с KCl, имеется один максимум, который наблюдается в области 10 кГц. На рисунке 3(б) показаны те же зависимости для зерен, которые вымачивались в течение 2 суток.

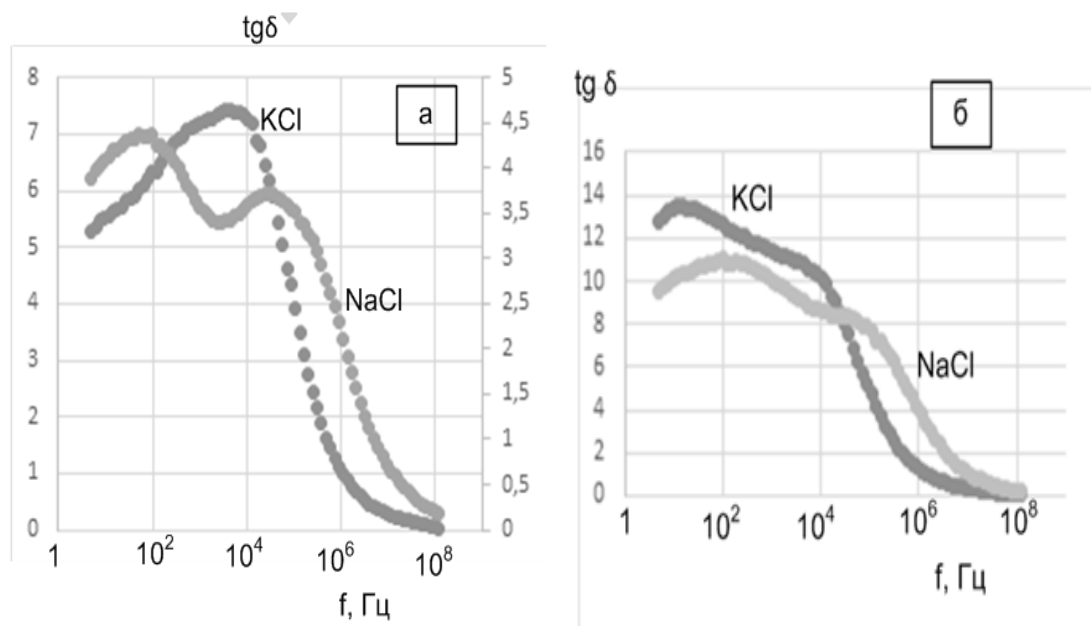


Рисунок 3. Спектральная зависимость тангенса диэлектрических потерь для зерен, вымоченных в течение 1 суток (а) и 2 суток (б).

Значительный рост диэлектрической проницаемости в области низких частот может обуславливаться несколькими причинами:

1. Наличием двойного электрического слоя, который образуется в результате перехода неорганических ионов, входящих в органическую структуру поверхности зерна, в жидкость. Избирательная адсорбция гидратированных ионов на поверхность твердой частицы.

2. Вкладом в значение диэлектрической проницаемости проводимости. В водных электролитических средах, к которым можно отнести растворы, входящие в структуру зерна, комплексную диэлектрическую проницаемость в упрощенном виде можно выразить как [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ω — частота; τ — время релаксации; ϵ_s и ϵ_∞ — статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости, σ — ионная проводимость; ϵ_0 - электрическая (диэлектрическая постоянная); τ - время релаксации.

Из уравнения (2) следует, что в эффективное значение диэлектрической проницаемости вносит вклад ионная проводимость, который становится значительным при $\omega \rightarrow 0$, это приводит к столь значительной величине ϵ' (как отмечено выше, на частоте 5 Гц эффективная величина ϵ' достигает $\sim 10^7$). С повышением частоты разница в значениях ϵ' между образцами уменьшается, но она существует и на предельной частоте 120 МГц, которая использовалась в эксперименте. Значения высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ_∞ для образцов с NaCl и KCl, которые соответственно равны 24,1 и 7,9, выше значения ϵ_∞ зерен, вымоченных в дистиллированной воде, в таких зернах ее значение составляет ~ 5 [3].

Релаксационные свойства электролитических растворов определяются коэффициентом диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Дисперсионную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ можно определить из (1) и (2), и согласно этим уравнениям наибольшая величина потерь поглощаемой энергии наблюдается на частоте $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$, где τ - время релаксации.

Значительные отличия в дисперсионной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ зерен с NaCl и KCl и времен релаксации, что следует из рисунка 3(а), указывают на то, что процессы поглощения электромагнитной энергии в этих образцах протекают не схожим образом. Возможное объяснение полученного результата заключается в специфике распределения ионов K и Na в клетках зерна. Согласно имеющимся данным [6], в то время как ионы K распределены преимущественно внутри клетки, ионы Na активно выталкиваются из клетки в межклеточное пространство. Поэтому, при протекании переменного тока через биологическую ткань зерна с разным содержанием ионов K и Na в

дисперсионной зависимости коэффициента потерь области максимальной релаксации расположены в разных частотных диапазонах.

В заключении можно сказать, что частотные зависимости электрических характеристик зерен пшеницы связаны с особенностями внедрения ионов Na и K в клетки зерна. Полученные данные указывают на то что электрические свойства увлажненных зерен пшеницы во многом определяются составом ионов, входящих в биоструктуру зерна. Этот факт необходимо учитывать при конструировании различных электрофизических устройств, определяющих качество зерна, в том числе и влажность.

Библиографический список

1. Funk, D. B. Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement / D. B. Funk, Z. Gillay, P. Meszaros. // *Measurement Science and Technology*. – 2007. Vol. 18, № 4. – P. 1004–1015. DOI: 10.1088/0957-0233/18/4/007.
2. Nelson, S. O. Use of material dielectric properties for agricultural applications / S. O. Nelson, S. Trabelsi // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. – 2016. – Vol. 50 (4). – P. 237–268. DOI: 10.1080/08327823.2016.1247235.
3. Чжан, А. В. Метод импедансной спектроскопии для тестирования увлажненных зерен пшеницы / А. В. Чжан, Н. А. Дрокин, Н. М. Ничкова, Ж. М. Мороз // *Вестник Новосибирского ГАУ*. – 2022. – № 2 (63). – С. 59–68. – DOI 10.31677/2072-6724-2022-63-2-59-68.
4. Чжан, А. В. Особенности спектральных характеристик электрического импеданса увлажненных зерен пшеницы / А. В. Чжан, Н. А. Дрокин, Н. М. Ничкова, Ж. М. Мороз // *Успехи современного естествознания*. – 2022. – № 5. – С. 34–38. – DOI: 10.17513/use.37821.
5. Айген, М. Теоретическая основа релаксационной спектроскопии / М. Айген, Л. Мейер // *Методы исследования быстрых реакций*. – М.: Мир, 1977. – С. 79–172.
6. Кларксон, Д. Транспорт ионов и структура растительной клетки: монография / Д. Кларксон. – М.: Мир, 1978. – 368 с.