

Научная статья

УДК 628.511.633.85

doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-72-80

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ СЕМЯН КЛЕЩЕВИНЫ

Андрей Борисович Чебанов¹, Николай Иванович Стручаев², Светлана Викторовна Адамова³✉,
Юлия Васильевна Чебанова⁴

^{1, 2, 3, 4} Мелитопольский государственный университет, г. Мелитополь, Россия,

¹chebanov-ab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8457-0574>

²usun105@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8891-4960>

³adamova164@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4857-4524>

⁴Chebanovafeb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8748-9627>

Резюме. Цель исследований – повышение эффективности обрушивания семян клещевины и разделение ее рушанки в общем технологическом процессе переработки материала. В технологии переработки клещевины важное место занимает операция обрушивания и разделения её рушанки, которая должна предотвратить попадание в конечный продукт переработки ядовитых веществ, таких как рицин, риксинин и аллерген. При применении электрофизических способов воздействия на семена клещевины необходимо иметь представление об электрических свойствах компонентов семян клещевины, таких как ядро и лузга. Знание таких свойств необходимо для разработки устройств, которые будут использовать электрические поля в технологических операциях обрушивания семян клещевины и разделения её рушанки. Однако, так как семена сельскохозяйственных культур относятся к диэлектрикам, а в любом диэлектрике протекают процессы поляризации, то без понимания этих процессов применительно к семенам клещевины обосновать их электрические свойства не представляется возможным. Поэтому целью статьи является установление процессов в компонентах семян клещевины, протекающих под действием приложенного к ним напряжения путем обоснования параметров электрической схемы замещения. В результате проведенного обоснования, получены уравнения для определения параметров электрической схемы замещения для ядра и семян клещевины, а именно: ёмкости, обусловленной электронной и ионной поляризацией, ёмкости, обусловленной дипольной и структурной поляризацией, сопротивления, обусловленного дипольной и структурной поляризацией, сопротивления току сквозной проводимости. Такие уравнения позволят в процессе исследований установить электрические свойства (тангенс угла диэлектрических потерь, относительную диэлектрическую проницаемость и электропроводность) ядра и лузги семян клещевины с учетом влажности семян, температуры и частоты питающей сети.

Ключевые слова: обрушивание, семена клещевины, рушанка, лузга, ядро, электрофизическое воздействие, переработка клещевины.

Для цитирования: Чебанов А. Б., Стручаев Н. И., Адамова С. В., Чебанова Ю. В. Обоснование параметров электрической схемы замещения компонентов семян клещевины // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. Т. 9, № 4. С. 72-80 doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-72-80

Original article

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF ELECTRICAL SUBSTITUTION DIAGRAM FOR CASTORE SEED COMPONENTS

Andrey B. Chebanov¹, Nikolai I. Struchayev², Svetlana V. Adamova³✉, Yulia V. Chebanova⁴

^{1, 2, 3, 4} Melitopol State University, Melitopol, Russia

¹chebanov-ab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8457-0574>

²usun105@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8891-4960>

³adamova164@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4857-4524>

⁴Chebanovafeb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8748-9627>

Abstract. The purpose of the research is to increase the efficiency of hulling castor bean seeds and separating its crushed seeds in the general technological process of material processing. In the technology of castor bean processing, an important place is occupied by the operation of hulling and separating its crushed beans, which should prevent toxic substances such as ricin, ricinin and allergen from entering the final product of processing. When applying electrophysical methods of influencing castor bean seeds, it is necessary to have an understanding of the electrical properties of the components of castor bean seeds, such as the kernel and husk. Knowledge of such properties is necessary for the development of devices that will use electric fields in the technological operations of hulling

castor bean seeds and separating its crushed grain. However, since the seeds of agricultural crops are dielectrics, and polarization processes occur in any dielectric, it is not possible to substantiate their electrical properties without understanding these processes in relation to castor bean seeds. Therefore, the purpose of the article is to establish processes in the components of castor bean seeds that occur under the influence of voltage applied to them by substantiating the parameters of the electrical equivalent circuit. As a result of the justification, equations were obtained to determine the parameters of the electrical equivalent circuit for the kernel and seeds of castor beans, namely: capacitance due to electronic and ionic polarization, capacitance due to dipole and structural polarization, resistance due to dipole and structural polarization, resistance to through conduction current. Such equations will make it possible in the process of research to establish the electrical properties (dielectric loss tangent, relative dielectric constant and electrical conductivity) of the kernel and husk of castor bean seeds, taking into account the moisture content of the seeds, temperature and frequency of the power supply network.

Key words: hulling, castor bean seeds, rushanka, husk, kernel, electrophysical impact, castor bean processing.

For citation: Chebanov, A. B., Struchaev, N. I., Adamova, S. V. & Chebanova, Yu. V. (2024). Justification of parameters of electrical substitution diagram for castore seed components. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 9, 4. 72-80. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-72-80

Масличные культуры имеют важное народнохозяйственное значение, поскольку являются источником получения ценных продовольственных и технических продуктов. Среди масличных культур важное место занимает клещевина, основной продукт переработки которой является касторовое масло, используемое для химической, электротехнической, медицинской, авиационной и других отраслей промышленности [1].

Качество тех или иных продуктов переработки клещевины в значительной степени зависит от принятой технологии. В технологии переработки клещевины важное место занимает операция обрушивания и разделения рушанки семян клещевины, которая призвана предотвратить попадание в конечный продукт переработки ядовитых веществ, таких как рицин, рицинин и аллерген [2]. При применении электрофизических способов воздействия на семена клещевины необходимо иметь представление об электрических свойствах [3] компонентов семян клещевины, таких как ядро и лузга. Знание таких свойств необходимы для разработки устройств, которые будут использовать электрические поля в технологических операциях обрушивания семян клещевины и разделения её рушанки.

Цель исследований: повышение эффективности обрушивания семян клещевины и разделение её рушанки в общем технологическом процессе переработки материала.

Задачи исследований: изучение процессов, протекающих в составных частях семян клещевины и определение параметров схемы замещения для этих компонентов с целью установления их электрических свойств, связанных с процессами поляризации.

Так как семена сельскохозяйственных культур относятся к диэлектрикам [4], а в любом диэлектрике протекают процессы поляризации, то без понимания этих процессов применительно к семенам клещевины, обосновать их электрические свойства не представляется возможным, что и является актуальной задачей данной статьи.

Материал и методы исследований. Важнейшими электрическими свойствами диэлектриков [4], к которым относятся семена сельскохозяйственных культур, являются тангенс угла диэлектрических потерь, относительная диэлектрическая проницаемость и электропроводность этих материалов.

Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, а также угол диэлектрических потерь характеризует способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле. Чем больше будет рассеиваться мощность в диэлектрике, переходящая в тепло, тем больше будет угол диэлектрических потерь δ и его функция $tg\delta$ [5]. В общем случае, выражение для мощности рассеяния энергии в единице объёма диэлектрика (удельные диэлектрические потери), определится по формуле [6]

$$P_{уд} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon tg\delta E^2, \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – удельные потери, Вт/м³;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с;

f – частота сети, Гц;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м [7];

E – напряженность электрического поля, В/м;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость, о.е.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε в выражении (1) будет показывать, во сколько раз поле ослабляется диэлектриком, количественно характеризуя свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле [5]. Процессы поляризации обуславливаются протеканиями токов внутри семени, вследствие которых и поглощается энергия от источника поля [8]. Количество же этой поглощенной энергии будет сильно зависеть, в том числе, от напряженности и частоты сети (1), что также подтверждено в [9,10].

У всех диэлектрических материалов в большей или меньшей степени проявляется электрическая проводимость. Появление электропроводности обусловлено тем, что под воздействием не меняющегося во времени напряжения, такие материалы пропускают очень незначительный ток. Количественно электропроводность характеризуется удельной объемной проводимостью $\gamma_{об}$ куба размером $1 \times 1 \times 1$ м, причем, постоянный ток проходит через куб между двумя противоположными гранями [11]:

$$\gamma_{об} = \frac{I}{SE}, \quad (2)$$

где I – сила тока, А;

S – площадь поперечного сечения, м²;

E – напряженность электрического поля, В/м;

В прикладных целях электропроводность можно характеризовать величиной обратной удельной объемной проводимости по физическому смыслу, а именно, удельным объемным электрическим сопротивлением ρ_v [11]:

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (3)$$

где R – объемное сопротивление исследуемого образца, Ом;

l – толщина образца, м.

Конечной целью при операциях обрушивания семян клещевины и разделения её рушанки является получение чистого ядра без присутствия в нём лузги. На эффективность этих операций с использованием электрофизических способов воздействия будут влиять электрические свойства отдельных компонентов семян (лузги и ядра семени) с учётом их влажности и температуры. При этом, необходимо учитывать тот факт, что с повышением температуры и влажности удельное объемное сопротивление таких материалов сильно уменьшается. У нейтральных диэлектриков (абсолютно сухой материал лузги и ядра семян клещевины) диэлектрическая проницаемость слабо зависит от температуры, а у полярных (влага) – возрастает с увеличением температуры [12].

В общем понимании, поляризация обуславливается протеканием через диэлектрик токов под действием приложенного к ней напряжения [13]. Но существует большое количество видов поляризации, в результате чего протекают и разные токи в таком диэлектрике [14]. Виды протекающих поляризаций, конечно же, будут зависеть от вида диэлектрика.

Для семян клещевины или их компонентов (лузга и ядро), общий ток, который будет проходить через них под действием приложенного синусоидального напряжения, будет складываться из следующих составляющих:

1. Токов, обусловленных ионной и электронной поляризацией семян. Такие виды поляризации присущи всем твердым диэлектрикам (такими являются и семена клещевины). Явления носят чисто упругий характер, поэтому при таких поляризациях создается только реактивный ток емкостного характера [14]. Наличие процессов ионной и электронной поляризации в семенах сельскохозяйственных культур подтверждается и в [15].

2. Токов, обусловленных дипольной и структурной поляризацией семян. Дипольная поляризация присуща всем полярным диэлектрикам, а структурная – связана с неоднородностью диэлектрика (наличие примесей, слоистость диэлектрика), помещенного в электрическое поле [14]. Все семена сельскохозяйственных культур имеют сложную слоисто-неоднородную структуру [16], что объясняет присутствие структурной поляризации. Семена клещевины обладают определенной начальной влажностью. Кроме этого, в процессе увлажнения их показатель влажности будет увеличиваться. С учётом [15], влагу в семенах можно рассматривать, как полярный диэлектрик, которому будет присуще явление дипольной поляризации.

3. Тока сквозной проводимости, обусловленного его протеканием по каналам сплошной проводимости в общей структуре диэлектрика. Все диэлектрические материалы под воздействием постоянного напряжения пропускают некоторый незначительный ток, называемый током утечки [7].

Учитывая изложенное, можно определить эквивалентную схему замещения (рис.1) такого диэлектрика (для ядра и лузги семян клещевины).

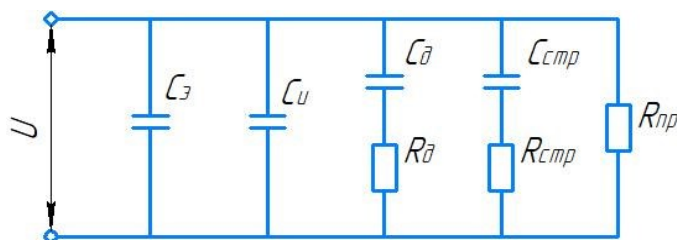


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения для лузги и ядра семян клещевины:

$C_э$ – ёмкость, обусловленная электронной поляризацией; $C_и$ – ёмкость, обусловленная ионной поляризацией; $C_д, R_д$ – ёмкость и сопротивление, обусловленные дипольной поляризацией; $C_стр, R_стр$ – ёмкость и сопротивление, обусловленные структурной поляризацией; $R_пр$ – сопротивление току сквозной проводимости

Результаты исследований. При расчете параметров схемы замещения вводим упрощения:

1. Ионная и электронная поляризации относятся к процессам быстрой поляризации, поэтому расчет ёмкости, обусловленной электронной и ионной поляризацией $C_{эи}$, будет производиться в целом для этих двух процессов.

2. Дипольная и структурная поляризация относятся к процессам медленной поляризации, поэтому расчет ёмкости $C_{д.стр}$ и $R_{д.стр}$ сопротивления, обусловленных дипольной и структурной поляризацией, будет также производиться в целом для этих двух процессов.

Учитывая введенные упрощения, составлена упрощенная эквивалентная электрическая схема замещения для лузги и ядра семян клещевины (рис. 2).

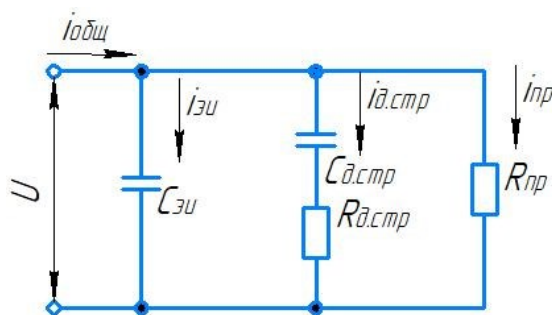


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная электрическая схема для ядра и лузги для семян клещевины:

$C_{эи}$ – ёмкость, обусловленная электронной и ионной поляризацией;
 $C_{д.стр}, R_{д.стр}$ – ёмкость и сопротивление, обусловленные дипольной и структурной поляризацией

Ёмкость, обусловленную электронной и ионной поляризацией $C_{эи}$, будем определять методом комплексных проводимостей при подключении к источнику переменного тока. Используя такой метод, для схемы (рис. 2), полная проводимость Y выразится выражением:

$$Y = -\frac{1}{j\omega C_{эи}} + \frac{1}{R_{пр}} + \frac{1}{R_{д.стр} - \left(\frac{j}{\omega C_{д.стр}}\right)}, \quad (4)$$

Умножив числитель и знаменатель третьей составляющей уравнения (4) на $R_{д.стр} + \left(\frac{j}{\omega C_{д.стр}}\right)$, получим:

$$Y = -\frac{1}{j\omega C_{эи}} + \frac{1}{R_{пр}} + \frac{R_{д.стр} + \left(\frac{j}{\omega C_{д.стр}}\right)}{R_{д.стр}^2 + \left(\frac{1}{\omega^2 C_{д.стр}^2}\right)}. \quad (5)$$

Вычислим реактивную составляющую проводимости уравнения (5) в комплексной форме

$$B = j\omega C_{эи} + j \left(\frac{\left(\frac{1}{\omega C_{д.стр}}\right)}{R_{д.стр}^2 + \left(\frac{1}{\omega^2 C_{д.стр}^2}\right)} \right). \quad (6)$$

Так как

$$B = -\frac{1}{j\omega C_{\text{общ}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{общ}}$ – общая ёмкость в цепи переменного тока для эквивалентной схемы замещения диэлектрика (рис. 2), Ф; то, подставив уравнение (7) в (6), получим:

$$\omega C_{\text{общ}} = \omega C_{\text{эи}} + \frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}} R_{\text{д.стр}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)}. \quad (8)$$

Разделив каждую составляющую уравнения (8) на ω , получим:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{эи}} + \frac{1}{\omega^2 C_{\text{д.стр}} R_{\text{д.стр}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)}. \quad (9)$$

С учетом того, что $\omega = 2\pi f$, ёмкость $C_{\text{эи}}$, обусловленная электронной и ионной поляризацией определится так

$$C_{\text{эи}} = C_{\text{общ}} - \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{\text{д.стр}} R_{\text{д.стр}}^2 + \left(\frac{1}{C_{\text{д.стр}}}\right)}, \quad (10)$$

где f – частота сети, Гц.

Активное сопротивление $R_{\text{д.стр}}$ и ёмкость $C_{\text{д.стр}}$, обусловленные структурной и дипольной поляризацией, определим методом комплексных проводимостей при подключении к источнику переменного тока, выразив из уравнения (5) активную составляющую проводимости в комплексной форме

$$G = \frac{1}{R_{\text{изм}}} = \frac{1}{R_{\text{пр}}} + \frac{R_{\text{д.стр}}}{R_{\text{д.стр}}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)^2}, \quad (11)$$

где $R_{\text{изм}}$ – измеренное активное сопротивление, Ом.

Введем обозначение Δ :

$$\Delta = G - \frac{1}{R_{\text{пр}}} = \frac{1}{R_{\text{изм}}} - \frac{1}{R_{\text{пр}}}. \quad (12)$$

Тогда, с учетом выражения (11), получим

$$\Delta R_{\text{д.стр}}^2 + \Delta \left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)^2 = R_{\text{д.стр}}. \quad (13)$$

Определим $\left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)^2$ из выражения (13):

$$\left(\frac{1}{\omega C_{\text{д.стр}}}\right)^2 = \frac{R_{\text{д.стр}}}{\Delta} - R_{\text{д.стр}}. \quad (14)$$

Если при ω_1 измеряем $R_{\text{изм}1}$, а при ω_2 измеряем $R_{\text{изм}2}$, то получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{\omega_1 C_{\text{д.стр}}}\right)^2 = \frac{R_{\text{д.стр}}}{\Delta_1} - (\omega_1 R_{\text{д.стр}})^2 \\ \left(\frac{1}{\omega_2 C_{\text{д.стр}}}\right)^2 = \frac{R_{\text{д.стр}}}{\Delta_2} - (\omega_2 R_{\text{д.стр}})^2 \end{cases}. \quad (15)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_2$ – угловая частота при соответствующих частотах сети f_1 и f_2 , рад/с;

$$\Delta_1 = \frac{1}{R_{изм1}} - \frac{1}{R_{пр}}; \Delta_2 = \frac{1}{R_{изм2}} - \frac{1}{R_{пр}}.$$

Приравниваем первое и второе уравнение системы (15) и получаем:

$$\frac{\omega_1^2 R_{д.стр}}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2 R_{д.стр}}{\Delta_2} = (\omega_1 R_{д.стр})^2 - (\omega_2 R_{д.стр})^2. \quad (16)$$

Каждое слагаемое в выражении (16) разделим на $R_{д.стр}$ и получим:

$$\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2} = R_{д.стр}(\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (17)$$

Из формулы (17) определяем общее активное сопротивление дипольной и структурной поляризации $R_{д.стр}$:

$$R_{д.стр} = \frac{\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (18)$$

Емкость дипольной и структурной поляризации $C_{д.стр}$ будем определять из уравнения (11) с учётом частоты сети f_1 (уравнение 15). Для этого, используя уравнение (18), выразим составляющую $\left(\frac{1}{\omega_1 C_{д.стр}}\right)^2$:

$$\left(\frac{1}{\omega_1 C_{д.стр}}\right)^2 = \frac{\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}}{\Delta_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} - \left(\frac{\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}\right)^2, \quad (19)$$

или

$$\left(\frac{1}{\omega_1 C_{д.стр}}\right)^2 = \frac{\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}}{\Delta_1} - \left(\frac{\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}\right)^2. \quad (20)$$

Приводим к общему знаменателю правую часть уравнения (20)

$$\left(\frac{1}{\omega_1 C_{д.стр}}\right)^2 = \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right) - \Delta_1\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right)^2}{\Delta_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}, \quad (21)$$

после умножения на ω_1^2 , получим:

$$\left(\frac{1}{C_{д.стр}}\right)^2 = \frac{\omega_1^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right) - \Delta_1\omega_1^2\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right)^2}{\Delta_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}, \quad (22)$$

откуда выразим емкость структурной и дипольной поляризации $C_{д.стр}$:

$$C_{д.стр} = \sqrt{\frac{\Delta_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right) - \Delta_1\omega_1^2\left(\frac{\omega_1^2}{\Delta_1} - \frac{\omega_2^2}{\Delta_2}\right)^2}}. \quad (23)$$

Сопротивление току сквозной проводимости $R_{пр}$ будем определять методом проводимостей при подключении к источнику постоянной электродвижущей силы $E_{ист}$. Тогда упрощенная эквивалентная электрическая схема замещения для ядра и лузги семян клещевины (рис. 3) будет иметь вид:

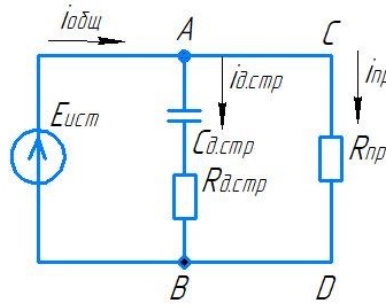


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная электрическая схема замещения для ядра и лузги клещевины при подключении к источнику постоянной электродвижущей силы (э.д.с)
 $E_{уст}$ – источник постоянного тока

Исходя из определения, что активная проводимость – это величина, обратная активному сопротивлению, определим общую активную проводимость:

$$G = \frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{R_{пр}} + \frac{1}{R_{д.стр} e^{\frac{t}{\tau}}}, \quad (24)$$

где G – активная проводимость, 1/Ом;
 $R_{д.стр}$ – активное сопротивление, обусловленное структурной и дипольной поляризацией, Ом;
 $R_{общ}$ – общее активное сопротивление в цепи постоянной э.д.с.;
 $R_{пр}$ – активное сопротивление току сквозной проводимости $i_{пр}$, Ом;
 t – время процесса, с;
 $\tau = R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}$ – постоянная времени цепи;
 $C_{д.стр}$ – ёмкость, обусловленная структурной и дипольной поляризацией, Ом.

Тогда, общее активное сопротивление в цепи постоянного тока определится по формуле:

$$R_{общ} = \frac{R_{пр} \cdot R_{д.стр}}{R_{пр} + R_{д.стр} e^{\frac{t}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}}}}. \quad (25)$$

После преобразования получим

$$R_{общ} \cdot R_{пр} = (R_{пр} \cdot R_{д.стр} - R_{общ} \cdot R_{д.стр}) e^{\frac{t}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}}} \quad (26)$$

Логарифмируем по основанию e :

$$\ln(R_{общ} \cdot R_{пр}) = \ln(R_{пр} \cdot R_{д.стр} - R_{общ} \cdot R_{д.стр}) + \frac{t}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}}, \quad (27)$$

или

$$\ln \frac{R_{общ} \cdot R_{пр}}{R_{пр} \cdot R_{д.стр} - R_{общ} \cdot R_{д.стр}} = \frac{t}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}}. \quad (28)$$

Если при исследованиях через время t_1 измеряем R_1 , а через время t_2 измеряем R_2 , то получаем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} \ln \frac{R_1 \cdot R_{пр}}{R_{пр} \cdot R_{д.стр} - R_1 \cdot R_{д.стр}} = \frac{t_1}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}} \\ \ln \frac{R_2 \cdot R_{пр}}{R_{пр} \cdot R_{д.стр} - R_2 \cdot R_{д.стр}} = \frac{t_2}{R_{д.стр} \cdot C_{д.стр}} \end{cases} \quad (29)$$

где R_1 – измеренное активное сопротивление в диэлектрике в момент времени t_1 , Ом;
 R_2 – измеренное активное сопротивление в диэлектрике в момент времени t_2 , Ом.

Отсюда:

$$\frac{t_2}{t_1} = \ln \frac{R_2 \cdot R_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{д.стр}} - R_2 \cdot R_{\text{д.стр}}} - \ln \frac{R_1 \cdot R_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{д.стр}} - R_1 \cdot R_{\text{д.стр}}}, \quad (30)$$

или

$$\frac{t_2}{t_1} = \ln \frac{R_2 \cdot R_{\text{пр}} (R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{д.стр}} - R_1 \cdot R_{\text{д.стр}})}{R_1 \cdot R_{\text{пр}} (R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{д.стр}} - R_2 \cdot R_{\text{д.стр}})}. \quad (31)$$

После сокращения на $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{д.стр}}$, получим:

$$\frac{t_2}{t_1} = \ln \frac{R_2 (R_{\text{пр}} - R_1)}{R_1 (R_{\text{пр}} - R_2)}. \quad (32)$$

Потенцируем уравнение (32) по основанию e

$$e^{\frac{t_2}{t_1}} = \frac{R_2 (R_{\text{пр}} - R_1)}{R_1 (R_{\text{пр}} - R_2)}. \quad (33)$$

Выражаем активное сопротивление току сквозной проводимости $R_{\text{пр}}$:

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_2 R_1 (e^{\frac{t_2}{t_1}} - 1)}{R_1 e^{\frac{t_2}{t_1}} - R_2}. \quad (34)$$

Уравнение (10) по определению электронной и ионной поляризации $C_{\text{эи}}$, уравнение (23) по определению ёмкости структурной и дипольной поляризации $C_{\text{д.стр}}$ и уравнение (34) по определению активного сопротивления току сквозной проводимости $R_{\text{пр}}$ дают возможность описать изменения этих параметров для упрощенной эквивалентной электрической схемы в ядре и лузге семян клещевины (рис. 2).

Заключение. Получены уравнения для определения параметров электрической схемы замещения для ядра и семян клещевины: ёмкости, обусловленной электронной и ионной поляризацией; ёмкости, обусловленной дипольной и структурной поляризацией; сопротивления, обусловленного дипольной и структурной поляризацией; сопротивления току сквозной проводимости. Такие данные позволят в процессе исследований установить электрические свойства (тангенс угла диэлектрических потерь, относительную диэлектрическую проницаемость и электропроводность) ядра и лузги семян клещевины.

Список источников

1. Didur V., Kyurchev V., Chebanov A., Aseev A. Increasing the efficiency of the technological process of processing castor oil seeds into castor oil. Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer Nature Switzerland AG. P.17-28 doi: 10.1007/978-3-030-14918-5_3
2. Дидур В. А., Чебанов А. Б. Методика определения концентрации пыли в воздухе рабочей зоны при обрушении семян клещевины // Труды Таврического государственного агротехнологического университета. Мелитополь, 2009. Т. 2., № 9. С. 169-175.
3. Шмигель В. И., Козлов А. С. Удаление семян пшеницы из ячеистой поверхности при наложении электростатического поля // Послеуборочная обработка зерновых культур. ЧИМЭСХ. 1972. Вып. 69. С. 139-144.
4. Лавров И. М., Шмигель В. Н. О механизме заряжения семян в электростатическом поле // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. Вып. 12. С. 42-43.
5. Фрёлих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. 1960. 251 с.
6. Рез И. С., Поплавко Ю. М., Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
7. Прищеп Л. Г., Цатурян А. И. Электрические явления в сыпучих средах и их применение // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1980. №1. С.32-36.
8. Пашинский В. А., Бондарчук О.В. Воздействие неоднородного электрического поля на экстрактивность пивоваренного ячменя // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века: материалы 19 международной научной конференции, Минск, 23-24 мая 2019 г. В 3 ч. Ч. 3. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. С. 148-151.
9. Коренков Д. А. Повышение энергоэффективности электротехнологических комплексов вакуумно-высокочастотной сушки древесины. Дис...канд. техн. наук. Орёл. 2017. 155 с.
10. Княжевская В. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение. 71 с.
11. Ляпин В. Г. Исследование электрических свойств растительной ткани в электромагнитном поле // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2008. № 4. С. 14-16.
12. Бородин И., Шмигель В. Электричество на очистке и сепарации семян // Сельский механизатор. 1997. № 10. С. 20-22.

13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Гостехиздат.
14. Болога М. К. Берилл И. И. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле: монография. Ch.: I.E.P. «Stiinta», 2004. 216 с.
15. Зубова Р. А. Обоснование режимов предпосевной обработки семян с твердой оболочкой ультразвуком и электромагнитным полем сверхвысокой частоты : автореф. дис.: канд. техн. наук. / Р. А. Зубова. Красноярск. 2017. 141 с.
16. Тарушкин В. И. Воздействие пандемоторных сил на семена при сепарации // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Минск. 1983. Вып. 12. С. 35-39.

References

1. Didur, V., Kyurchev, V., Chebanov, A. & Aseev, A. (2019). Increasing the efficiency of the technological process of processing castor-oil seeds into castor oil. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer Nature Switzerland AG. 17-28. doi: 10.1007/978-3-030-14918-5_3
2. Didur, V. A. & Chebanov A. B. (2009). Methodology for determining the concentration of dust in the air of the working area during the collapse of castor seeds. *Proceedings of the Taurida State Agrotechnological University '09*. (pp. 169-175). Melitopol.
3. Shmigel, V. I. & Kozlov, A. S. (1972). Removal of wheat seeds from a cellular surface when applying an electrostatic field // *Posleuborochnaja obrabotka zernovyh kul'tur*. ChIMJeSH. 69. 139-144 (in Russ).
4. Lavrov, I. M. & Shmigel, V. N. (1983). On the mechanism of seed charging in an electrostatic field // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 12, 42-43 (in Russ).
5. Frelich, G. (1960). Theory of dielectrics. Permittivity and dielectric losses.
6. Rez IS, P. Y. (1989). Dielectrics: basic properties and applications in electronics. Fig.
7. Prishchep, L. G. & Tsaturyan, A. I. (1980). Electrical phenomena in granular media and their application. *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 1, 32-36 (in Russ).
8. Pashinsky, V. A. & Bondarchuk O. V. (2019). The impact of a non-uniform electric field on the extractivity of malting barley // *Saharovskie chtenija 2019 goda: jekologicheskie problemy XXI veka: materialy 19 mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*, At 3 hours. Part 3. Minsk: IVC Minfina, 148-151 (in Russ).
9. Korenkov, D. A. (2017). *Increasing the energy efficiency of electrical technological complexes for vacuum-high-frequency wood drying*. Orjol. (in Russ).
10. Knyazhevskaya, V. S. (1980). *High-frequency heating of dielectric materials*. Leningrad: Mechanical Engineering. Leningr. department (in Russ).
11. Lyapin, V. G. (2008). Study of the electrical properties of plant tissue in an electromagnetic field. *Vestnik FGOU VPO MGAU*. 4. 14-16 (in Russ).
12. Borodin, I. & Shmigel, V. (1997). Electricity in the cleaning and separation of seeds. *Sel'skij mehanizator*. 10. 20-22 (in Russ).
13. Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1957). *Electrodynamics of continuous media* (Vol. 68). Gostekhizdat. (in Russ).
14. Bologa, M. K. & Berill, I. I. (2004). *Refining sunflower oil in an electric field*. Ch.: I.E.P. "Stiinta" (in Russ).
15. Zubova, R. A. (2017). *Justification of the modes of pre-sowing treatment of seeds with a hard shell with ultrasound and an ultra-high frequency electromagnetic field*. Krasnoyarsk (in Russ).
16. Tarushkin, V. I. (1983). The impact of pandemotor forces on seeds during separation // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. Minsk. 12. 35-39 (in Russ).

Информация об авторах

А. Б. Чебанов – кандидат технических наук, доцент;
Н. И. Стручаев – кандидат технических наук, доцент;
С. В. Адамова – научный сотрудник;
Ю. В. Чебанова – кандидат географических наук, доцент.

Information about the authors

A. B. Chebanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
N. I. Struchaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
S. V. Adamova – Researcher;
Yu. V. Chebanova – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.06.2024; одобрена после рецензирования 1.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.
The article was submitted 26.06.2024; approved after reviewing 1.10.2024; accepted for publication 16.10.2024.