

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-231-1-83-91

А.А. Багаев

A.A. Bagaev

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ СТЕНКИ СТЕБЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

ELECTRICAL EQUIVALENT CIRCUIT OF STEM WALL SUBSTITUTION OF PLANT MATERIALS IN ELECTROSMOTIC DEWATERING PROCESSES

Ключевые слова: кормовые травы, электроосмос, электроплазмолиз, электроискровая обработка, энергоэффективность, стенка стебля, эквивалентная электрическая схема замещения, потенциальный барьер, лимитирующая стадия влагопереноса.

Повышение энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания растительных материалов, их электроискровой и электроимпульсной обработки, электроплазмолиза требует обоснования основных направлений уменьшения нерациональных затрат энергии, не приводящих к достижению желаемых результатов перечисленных электротехнологий. В этом случае растительный материал выступает в качестве элемента электрической цепи, моделирование электрических свойств которого невозможно без анализа его электрической эквивалентной схемы замещения. Целью является синтез электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля кормовых и других трав. Используются основные положения теории электрохимической кинетики, биофизики, мембранных процессов, теоретических основ электротехники. Разработанная схема замещения стенки стебля состоит из двух параллельных ветвей («прямой» и «обратной»), каждая из которых функционирует только в один из полупериодов синусоидального напряжения. Раздельная во времени работа ветвей схемы замещения обеспечивается включением в каждую из них идеального диода. Ток, протекающий через стенку стебля, представляет собой сумму «прямого» и «обратного» токов. Значение «прямого» тока определено концентрацией токоопределяющего иона на внутренней поверхности стенки стебля, «обратного» – на внешней. Каждый из этих токов, в свою очередь, состоит из тока переноса и тока сквозной проводимости. Нагрев растительной ткани кормовых трав в основном определяется величиной тока сквозной проводимости, который с увеличением частоты электромагнитных колебаний возрастает. Технологическое действие электрического тока обусловлено током переноса в «прямом» направлении, причем скорость переноса влаги про-

порциональна мгновенному его значению. Технологический эффект снижается с увеличением «обратного» тока и тока сквозной проводимости. Построенная схема замещения отражает наличие трех потенциальных барьеров у стенки стебля: двух граничных, представленных сопротивлением границы раздела фаз «стенка стебля-электролит», и одного внутреннего, представленного непосредственно сопротивлением стенки стебля.

Keywords: forage grasses, electroosmosis, electroplysmolysis, electro-spark treatment, energy efficiency, stem wall, equivalent electrical substitution scheme, potential barrier, limiting stage of moisture transfer.

Improving the energy efficiency of electrosmotic dehydration of plant materials, their electro-spark and electro-impulse treatment, and electroplysmolysis requires substantiation of the main directions for reducing irrational energy consumption that do not lead to the desired results of the above mentioned electro-technologies. In this case, the plant material acts as an element of an electric circuit and modeling its electrical properties is impossible without analyzing its electrical equivalent circuit of substitution. The research goal is to synthesize the electrical equivalent substitution circuit of the stem wall of forage and other grasses. The basic provisions of the theory of electrochemical kinetics, biophysics, membrane processes, and theoretical foundations of electrical engineering were used. The developed scheme of stem wall substitution consists of two parallel branches ("forward" and "reverse"); each of them functions only in one of the half-periods of sinusoidal voltage. The time-separated operation of the branches of the substitution scheme is ensured by the inclusion of an ideal diode in each of them. The current flowing through the stem wall is the sum of the "forward" and "reverse" currents. The value of the "forward" current is determined by the concentration of the current-detecting ion on the inner surface of the stem wall, and the "reverse" current on the outer surface. Each of these currents, in turn, consists of a transfer current and a through-conduction current. Heating of plant tissue of

forage grasses is mainly determined by the value of the current of through conduction which increases with increasing frequency of electromagnetic oscillations. The technological action of electric current is due to the transfer current in the "forward" direction, and the rate of moisture transfer is proportional to its instantaneous value. Technological effect de-

creases with the increase of "reverse" current and current of through conduction. The constructed substitution scheme reflects the presence of three potential barriers at the stem wall: two boundary barriers represented by the resistance of the interface "stem wall-electrolyte", and one internal barrier represented directly by the resistance of the stem wall.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Введение

Повышение энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания растительных материалов, их электроискровой и электроимпульсной обработки, электроплазмоллиза требует обоснования основных направлений уменьшения нерациональных затрат энергии, не приводящих к достижению желаемых результатов перечисленных электротехнологий. Одним из объектов электротехнологической обработки являются продукты растениеводства, а рабочим органом – с электромагнитными полями является электрический ток. В этом случае растительный материал выступает в качестве элемента электрической цепи, моделирование электрических свойств которого невозможно без анализа его электрической эквивалентной схемы замещения.

Результаты экспериментального исследования поляризационных свойств стенки стебля [1] показали, что вольт-амперная характеристика стенки стебля является нелинейной и несимметричной относительно начала координат, т.е. наблюдается неидеальный выпрямительный эффект по току и переносимой влаге. Известно [2], что для биохимических мембран вентиляционный эффект наблюдается в том случае, если потенциальный барьер, лимитирующий скорость влагопереноса, смещен в сторону одной из поверхностей мембраны.

Анализ экспериментальных ВАХ стенки стебля [1] свидетельствует о следующем: наклон кривой к оси напряжений показывает, что лимитирующим скорость токо-влажопереноса через стенку стебля является граничный барьер (граница раздела фаз «стенка стебля-электролит»), если кривая имеет наклон к оси токов – то внутренний (стенка стебля). Для подтверждения гипотезы и количественной оценки сопротивлений потенциальных барьеров требуется синтез схемы замещения стенки стебля.

Целью работы является синтез электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля кормовых и других трав.

Методы и средства представлены основными положениями теории электрохимической кинетики, биофизики, мембранных процессов, теоретических основ электротехники.

Результаты и обсуждение

Поляризационные характеристики стенки стебля являются нелинейными и несимметричными относительно начала координат [1]. В случае, если нелинейность характеристики сравнительно мала, нелинейный элемент может быть заменен источником постоянной ЭДС и линейным сопротивлением, равным по величине дифференциальному сопротивлению нелинейного сопротивления [3]. При этом схема замещения нелинейного элемента наряду с источником постоянной ЭДС и линейным сопротивлением должна включать в себя один или несколько идеальных диода.

Поперечный разрез стенки стебля кормовых трав и схематическое изображение протекания тока и переноса ионов через стенку стебля и его составляющие при наложении синусоидального напряжения рассмотрены в работе [4].

Для упрощения нелинейное сопротивление стенки стебля в «прямом» направлении целесообразно заменить линейным полным сопротивлением Z_1 «прямому» току, протекающему в направлении от внутренней поверхности стенки стебля к внешней и действующим согласно с этим током источником постоянной ЭДС E_1 или способствующей протеканию тока, или противодействующей ему. Величина ЭДС обусловлена наличием поляризационной электрической емкостью стенки стебля отличной от нуля.

Нелинейное сопротивление, соответствующее «обратной» ветви ВАХ стенки стебля, заменяется линейным сопротивлением Z_2 «обратному» току, пересекающему стенку стебля в направлении от внешней поверхности к внутрен-

ней, и действующим встречно с ним источником постоянной ЭДС E_2 . При этом $Z_1 \neq Z_2$. В соответствии с указанной заменой эквивалентная электрическая схема замещения стенки стебля состоит из двух параллельных ветвей, каждая из которых функционирует только в один из полупериодов синусоидального напряжения. Раздельная во времени работа параллельных ветвей схемы замещения обеспечивается включением в каждую из них идеального диода.

Предлагаемая замена позволяет моделировать стенку стебля схемой замещения, параметры которой не зависят от величины приложенного напряжения, и делает возможным рассматривать полученную электрическую цепь как линейную.

Для построения схемы замещения стенки стебля представим процесс транспортировки

$$i = zFk^0 \{ (c^o - \Delta c) \cdot \exp[(zF(1 - \alpha)\Delta\varphi_{m1})/RT] - (c^o + \Delta c) \cdot \exp[-zFa\Delta\varphi_{m2})/RT] \}, \quad (1)$$

где $k^0 = \vec{k} \cdot \exp\left[\frac{(-E_{on} - \Delta G(1 - \alpha))}{RT}\right] = \bar{k} \cdot \exp\left[\frac{(-E_{on} - \Delta G\alpha)}{RT}\right];$

z – заряд токоопределяющего иона;

F – число Фарадея;

\vec{k}, \bar{k} – коэффициенты проницаемости стенки стебля в «прямом» и «обратном» направлениях соответственно, см/с;

E_{on} – энергия активации переноса иона в состоянии равновесия, Дж/моль;

ΔG – изменение свободной энергии связывания молекул воды с ионом, Дж/моль;

$(1 - \alpha), \alpha$ – коэффициенты переноса иона в «прямом» и «обратном» направлениях соответственно;

Δc – разность концентраций токоопределяющего иона на поверхности стенки стебля (при $x=0$) и в глубине раствора электролита на расстоянии $x \rightarrow \infty$ от поверхности раздела фаз;

c^o – концентрация токопереносающего иона в глубине раствора электролита на расстоянии $x \rightarrow \infty$ до наложения внешнего электрического поля;

$(c^o - \Delta c), (c^o + \Delta c)$ – концентрация токоопределяющего иона на межфазной границе со стороны эпидермы и паренхимы соответственно, моль/м³;

$\Delta\varphi_{m1}, \Delta\varphi_{m2}$ – изменение разности электрических потенциалов между внутренней (паренхимой) и внешней (эпидерм) поверхностью стенки стебля и точкой, расположенной на расстоянии $x \rightarrow \infty$ по оси, составляющую нормаль к поверхности ионообменной поверхности во внешнем электрическом поле;

R – универсальная газовая постоянная.

В работе [5] установлен гармонический состав тока через стенку стебля.

Если плотность тока переноса через стенку стебля изменяется по несинусоидальному периодическому закону

$$i_{\Pi} = \pm \frac{I_0}{\pi} + \frac{I_0}{2} \sin \omega t \mp \frac{2I_0}{3\pi} \cos 2\omega t + \dots, \quad (2)$$

то при малых изменениях концентрации раствора ($\Delta c \ll 1$) отклонение разности потенциалов в электрическом поле от равновесного будет невелико: $\Delta\varphi_m \ll (RT/zF)$.

Разложив содержащие экспоненциальную функцию члены уравнения (1) в гармонический

токопереносающего иона в виде двух стадий, на первой из которых осуществляется перенос иона через границу раздела фаз «Стенка стебля-водный раствор электролита», а на второй – перенос иона непосредственно через стенку стебля. При этом ток i_F , пересекающий границу раздела фаз, состоит из тока переноса i_{Π} и тока перезарядки двойного электрического слоя (ДЭС) i_s , что было рассмотрено в [4]. Рассмотрим каждую стадию отдельно.

Стадия переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита». С учетом выражения для плотности тока через стенку стебля [4], А/м², уравнение для суммарного тока переноса через межфазную границу запишется в следующем виде:

ряд и пренебрегая малыми величинами вида $\Delta c \Delta\varphi_m$ (это позволяет сделать предположение о постоянстве напряженности электрического поля по всей толщине стенки стебля, т.е. $d\varphi/dx = const$):

$$i_{\Pi} = zFk^0 (2\Delta c + c^o zF\Delta\varphi_m/RT). \quad (3)$$

Результатом преобразований (3) относительно $\Delta\varphi_m$ имеем:

$$\Delta\varphi_m = \left(\frac{i_{\Pi}}{zFk^0} - 2\Delta c \right) \frac{RT}{c^o zF}. \quad (4)$$

Установить связь между током переноса и разностью электрических потенциалов в соот-

ветствии с (4) можно только в том случае, если известны концентрации токопереносящих ионов на поверхностях стенки стебля.

Выражения для распределения концентраций ионов на поверхности стенки стебля $c(0, t)$, на поверхности раздела фаз и разности концентраций ионов Δc получены в [6]:

$$\Delta c = c(0, t) - c^* = \mp \frac{I_0}{\pi z F D} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} - \frac{I_0}{2 z F D} \sqrt{\frac{D}{2 \omega}} [\sin(\omega t) - \cos(\omega t)] \pm \pm \frac{2 I_0}{3 \pi z F D} \sqrt{\frac{D}{4 \omega}} [\cos(2 \omega t) - \sin(2 \omega t)], \quad (5)$$

где c^* – концентрация токопереноса их ионов после наложения внешнего электрического поля;

D – эффективный коэффициент диффузии.

Подстановка (5) в (4) с учетом выражения для несинусоидального периодического тока (2) позволяет получить:

$$\Delta \varphi = \left[\pm \frac{I_0}{\pi z F k^0} + \frac{I_0}{2 z F k^0} \sin \omega t \mp \frac{2 I_0}{3 \pi z F k^0} \cos 2 \omega t \pm \pm \frac{I_0}{\pi z F \sqrt{D} \sqrt{\pi t}} + \frac{I_0}{z F \sqrt{D} \sqrt{2 \omega}} (\sin \omega t - \cos \omega t) + \right. \quad (6) \\ \left. + \frac{2 I_0}{3 \pi z F \sqrt{D} \sqrt{\omega}} (\mp \cos 2 \omega t \pm \sin 2 \omega t) \right] \frac{R T}{c^0 z F}.$$

Выражение (6) показывает частотную зависимость периодических отклонений разности потенциалов $\Delta \varphi$ между поверхностью стенки стебля и водным раствором электролита на расстоянии $x \rightarrow \infty$ по нормали от межфазной границы от равновесного значения.

При $t \rightarrow \infty$ членом $\frac{I_0}{\pi z F \sqrt{D} \sqrt{\pi t}}$ в выражении (6) можно пренебречь.

Тогда гармонические составляющие разности потенциалов $\Delta \varphi$:

постоянна составляющая

$$\Delta \varphi_{(0)} = \pm \frac{I_0}{\pi} \cdot \frac{1}{z F k^0} \cdot \frac{R T}{c^0 z F}; \quad (7)$$

первая гармоника

$$\Delta \varphi_{(1)} = \frac{I_0}{2} \sin \omega t \left[\frac{1}{z F k^0} + \frac{2}{z F \sqrt{D} \sqrt{2 \omega}} + \frac{2}{j z F \sqrt{D} \sqrt{2 \omega}} \right] \frac{R T}{c^0 z F}; \quad (8)$$

вторая гармоника

$$\Delta \varphi_{(2)} = \mp \frac{2 I_0}{3 \pi} \cos 2 \omega t \left[\frac{1}{z F k^0} + \frac{1}{z F \sqrt{D} \omega} + \frac{2}{j z F \sqrt{D} \omega} \right] \frac{R T}{c^0 z F}. \quad (9)$$

Принимая во внимание тот факт, что постоянная составляющая тока через емкость не проходит, представим стадию транспортировки иона к межфазной границе и переноса через нее в виде последовательного соединения следующих элементов:

$R_F = \frac{R T}{(z F)^2 k^0 c^0}$ – активное сопротивление стадии переноса иона через межфазную границу;

$R_W = \frac{2 R T}{(z F)^2 \sqrt{2 D \omega} c^0} = \frac{W}{\sqrt{\omega}}$ – активное сопротивление стадии транспортировки иона к межфазной границе;

$C_W = \frac{(z F)^2 \sqrt{D} c^0}{R T \sqrt{2 \omega}} = \frac{1}{W \sqrt{\omega}}$ – емкость стадии транспортировки иона к межфазной границе, где W в теории электрохимических цепей переменного тока носит название постоянной Варбурга [7].

Схема замещения стадии транспортировки иона к межфазной границе и переноса через нее в «прямом» и «обратном» направлениях представлена на рисунке 1а.

Однако ток, пересекающий границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита», в соответствии с положениями работы [4] состоит из двух составляющих: тока переноса i_{Π} , рассмотренного выше, и тока заряжения двойного электрического слоя (ДЭС) i_3 , который образуют ионы, накапливаясь на поверхности раздела фаз.

В связи с этим, используя формулу плоского конденсатора, с учетом (2) запишем:

$$\Delta \varphi_D = \frac{4 \pi \sigma h}{\varepsilon} = \frac{4 \pi h Q}{\varepsilon S} = \frac{4 \pi h}{\varepsilon S} \int i_3 dt = \frac{4 \pi h}{\varepsilon S} \int \left[\pm \frac{I_0}{\pi} + \frac{I_0}{2} \sin \omega t \mp \frac{2 I_0}{3 \pi} \cos 2 \omega t \right] dt = \quad (10) \\ = \frac{4 \pi h}{\varepsilon S} \int \left[\pm \frac{I_0}{\pi} + \frac{I_0}{j 2 \omega} \sin \omega t \mp \frac{2 I_0}{3 \pi} \frac{1}{j 2 \omega} \cos 2 \omega t \right] dt,$$

где $\Delta \varphi_D$ – межфазная разность потенциалов, В;

Q – заряд, образованный скоплением ионов на межфазной границе, Кл;

S – площадь, м²;

h – толщина ДЭС, м;

ε – диэлектрическая проницаемость.

Выражение (10) дает соотношение для емкости двойного электрического слоя:

$$C_D = \varepsilon S / 4 \pi h. \quad (11)$$

Таким образом, схема замещения, соответствующая стадии транспортировки иона к поверхности стенки стебля и переноса через границу раздела фаз «стенка стебля-электролит», показана на рисунке б и представляет собой параллельное соединение емкости ДЭС C_D и импеданса транспортировки заряженной частицы к межфазной границе и переноса иона через нее

$$R_F + R_W - j \frac{1}{\omega C_W} = R_F + \frac{W}{\sqrt{\omega}} - j \frac{W}{\sqrt{\omega}}.$$

Тогда полное сопротивление стадии транспортировки и переноса иона через границу раздела фаз:

$$Z_D = \left[j\omega C_D + \left(R_F + \frac{W}{\sqrt{\omega}} (1 - j) \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где $(1 - j) = \sqrt{2}/\sqrt{j}$ [8].

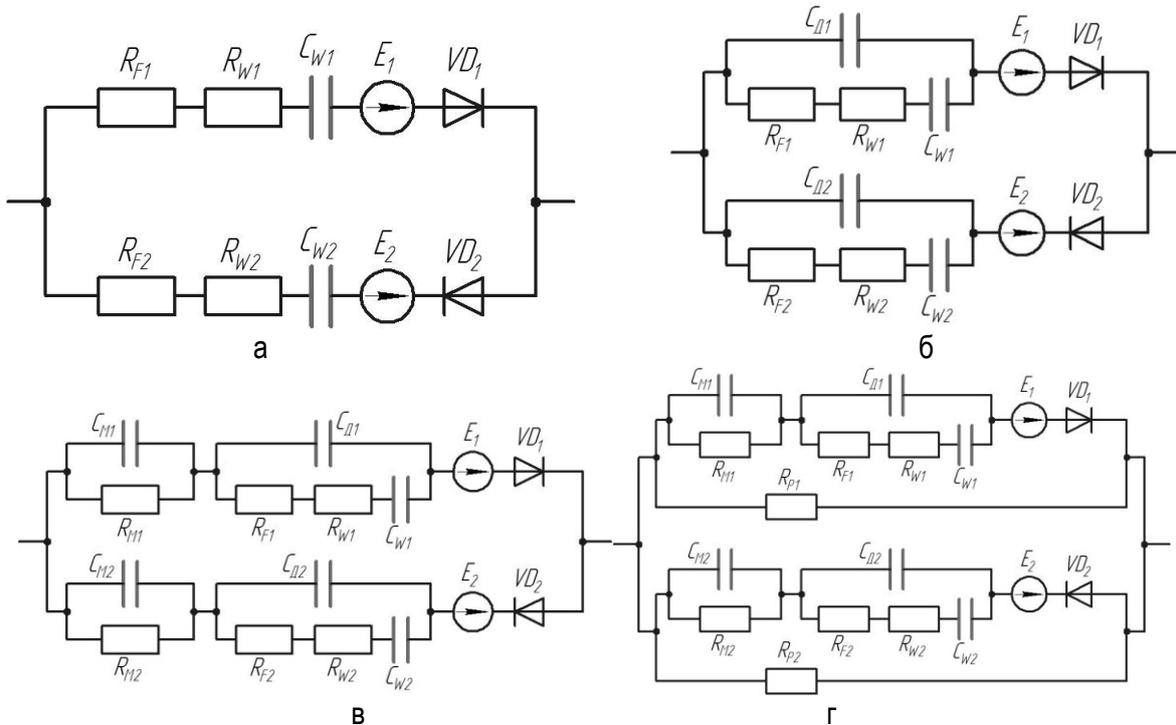


Рис. Этапы построения эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля

Учета процессов, описываемых схемой на рисунке а, оказывается недостаточно для определения потенциального барьера, лимитирующего скорость переноса иона через стенку стебля, т.к. последняя подобно другим диэлектрикам [9] обладает значительной поляризационной емкостью, т.е. обладает способностью создавать противодействующую протеканию тока ЭДС.

Стадия переноса иона через стенку стебля. Сопротивление, оказываемое переносу ионов непосредственно стенкой стебля, определяется с помощью выражения для полного тока, протекающего через стенку стебля [2], которое получено с использованием выражения для тока переноса [10, 4] при условии $\nabla\varphi = const$:

$$I_M = \frac{(zF)^2 \Delta\varphi k}{RT} \cdot \frac{c_q - c_P \exp(zF\Delta\varphi/RT)}{1 - \exp(zF\Delta\varphi/RT)}, \quad (13)$$

где $\Delta\varphi$ – отклонение разности потенциалов между внешней и внутренней поверхностями стенки стебля от равновесного во внешнем электрическом поле

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{эл} \pm \Delta\varphi_M = \Delta\varphi_{эл} \pm (\Delta\varphi_{D1} - \Delta\varphi_{D2}),$$

где знаки «+» и «-» соответствуют протеканию

тока в «прямом» и «обратном» направлениях соответственно;

c_q, c_P – концентрации ионов на внешней и внутренней поверхностях стенки стебля соответственно и принимаются пропорциональными концентрациям ионов в растворах электролита по обе стороны стенки стебля [2];

k – коэффициент пропорциональности.

Ток I_M (13) представляет собой сумму «прямого» тока I_q , пересекающего стенку стебля в направлении от внутренней поверхности стебля к наружной, и «обратного» I_P , протекающего в противоположном направлении:

$$I_M = I_q + I_P = \frac{(zF)^2 \Delta\varphi k}{RT} \cdot \frac{c_q}{1 - \exp(zF\Delta\varphi/RT)} + \frac{(zF)^2 \Delta\varphi k}{RT} \cdot \frac{c_P \exp(zF\Delta\varphi/RT)}{1 - \exp(zF\Delta\varphi/RT)}. \quad (14)$$

Анализ выражения (14) свидетельствует, что «прямой» ток зависит только от концентрации электролита, прилегающего к внутренней поверхности стенки стебля, а «обратный» – от концентрации электролита, прилегающего к внешней поверхности.

При $c_q = c^0 - \Delta c$ и $c_p = c^0 + \Delta c$ выражение (14) эквивалентно (3), которое с учетом (5) и (2) сводится к уравнению (6). С учетом сделанных ранее обозначений это позволяет моделировать стенку стебля последовательным

$$R_{FM} = \frac{RT}{(zF)^2 k^0 c^0}; R_{WM} = \frac{W_M}{\sqrt{\omega}}; C_{WM} = \frac{1}{W_M \sqrt{\omega}}; \quad (15)$$

или параллельным соединением элементов

$$R_M = \frac{(\sqrt{\omega} R_{FM} + W_M)^2 + W_M^2}{\sqrt{\omega} (R_{FM} \sqrt{\omega} + W_M)}, \quad (16)$$

$$C_M = \frac{W_M^2}{W_M \sqrt{\omega} [(R_{FM} \sqrt{\omega} + W_M)^2 + W_M^2]}.$$

В соответствии с (16) полная проводимость стенки стебля равна сумме активной $1/R_M$ и емкостной $j\omega C_M$ составляющих, а эквивалентная электрическая схема замещения стенки стебля представляет собой параллельное соединение сопротивления R_M и емкости C_M (рис. в). Полное сопротивление стенки стебля в соответствии со схемой замещения на рисунке в равно:

$$Z_M = \left[\frac{1}{R_M} + j\omega C_M \right]^{-1} = \frac{R_{FM} + W_M \sqrt{2}}{\sqrt{j\omega}}. \quad (17)$$

Схема замещения на рисунке в определяет сопротивление току технологическому воздействию i_F , но не учитывает того, что часть тока замыкается через водный раствор электролита, заполняющий межклеточное пространство, т.е. ток сквозной проводимости i_S [4]. Сопротивление току сквозной проводимости, по- существу, шунтирует растительную ткань стенки стебля, что сопровождается уменьшением технологической составляющей тока с одновременным увеличением нерационального термического его воздействия. Поэтому схема замещения стенки стебля должна учитывать влияние сопротивления току сквозной проводимости на эффективность обезвоживания растительных материалов.

Сопротивление току сквозной проводимости. Обработка материалов в электрическом поле сопровождается поглощением электромагнитной энергии и нагревом. В общем случае удельная мощность, затрачиваемая на нагрев, определяется величиной сквозной проводимости среды и наличием поляризации различного вида [11]:

$$\Delta P = \left(\gamma + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 t_i^2}{1 + \omega^2 t_i^2} \cdot s_i \right) E^2. \quad (18)$$

Откуда активная проводимость среды имеет вид:

$$\gamma_a = \gamma + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 t_i^2}{1 + \omega^2 t_i^2} \cdot s_i, \quad (19)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

γ – сквозная проводимость, См/м;

t_i – время релаксации поляризации i -го вида, с;

n – число видов поляризации;

s_i – начальная проводимость i -го вида поляризации, $s_i \neq \gamma$;

ω – угловая частота электрического поля, рад/с.

Условием упорядоченного смещения связанных зарядов и нагрева материала за счет тока смещения является превышение частоты электромагнитных колебаний над временем релаксации. Как установлено в [11], из различных видов поляризации – атомной, ионной, дипольной, структурной, электролитической и других влияние на нагрев при токах частотой менее 1000 Гц оказывает лишь два последних. Для других видов поляризации $t_i^{-1} \gg \omega$, т.е. нагрев материала обеспечивается практически сквозной проводимостью.

Плотность тока сквозной проводимости определяется следующим выражением [12]:

$$i_S = \gamma E, \quad (20)$$

Вместе с тем проводимость раствора электролита в слабых полях имеет вид [13]

$$\gamma = \frac{nz^2 \delta^2 f}{6kT} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right), \quad (21)$$

где n – число носителей заряда;

z – заряд носителя;

δ – длина свободного пробега;

f – частота электромагнитных колебаний;

k – постоянная Больцмана;

T – температура;

R – универсальная газовая постоянная.

Растительным тканям кормовых трав как капиллярно-пористым телам присуще то, что при поглощении жидкости они набухают, а при высушивании дают усадку [14]. При этом сечение капилляра изменяется, что затрудняет перемещение ионов. Это явление по теории «сжатия» капилляров Гиддинга-Бойяка [15] можно учесть, введя поправочный коэффициент

$$y = \frac{1 - (1 - \chi/\chi_0)\sqrt{\theta}}{(1 + (1 - \chi/\chi_0)\theta)(1 - \theta_1)(1 + a(1 - \chi/\chi_0)\theta)}, \quad (22)$$

где χ – проводимость набухших волокон;

χ_0 – проводимость свободного раствора электролита;

θ – доля объема, занятая набухшими волокнами;

θ_1 – доля объема, занятая ненабухшими волокнами;

α – коэффициент формы, характеризующий геометрические параметры пористых частиц.

Тогда с учетом (21) сквозная проводимость имеет вид:

$$y = \frac{nz^2\delta^2f}{6kT} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) y = \frac{1}{R_P} = \frac{\omega}{W_3}. \quad (23)$$

Анализ выражения (23) показывает, что с увеличением частоты электромагнитных колебаний сквозная проводимость возрастает. При этом увеличиваются ток сквозной проводимости i_S и нагрев растительной ткани. Это, в свою очередь, сопровождается увеличением «обратного» тока и снижением эффективности обработки.

Отсутствие функциональной зависимости сквозной проводимости от напряженности электрического поля и плотности тока делает возможным представить сопротивление току сквозной проводимости активным элементом $R_P = W_3/\omega$ (рис. г).

Таким образом, полная электрическая эквивалентная схема замещения стенки стебля представлена на рисунке г, при построении которой нелинейное сопротивление «прямой» ветви ВАХ стенки стебля заменено линейным сопротивлением и источником постоянной ЭДС, действующей согласно с «прямым» током, протекающим в направлении от внутренней поверхности стенки стебля к наружной. Нелинейное сопротивление «обратной» ветви ВАХ заменено линейным сопротивлением и источником постоянной ЭДС, действующей встречно с «обратным» током, протекающим в направлении от наружной поверхности стенки стебля к внутренней. Причем сопротивление стенки стебля в «прямом» направлении меньше, чем в «обратном».

Схема замещения стенки стебля состоит из двух параллельных ветвей («прямой» и «обратной»), каждая из которых функционирует только в один из полупериодов синусоидального напряжения. Раздельная во времени работа ветвей схемы замещения обеспечивается включением в каждую из них идеального диода.

Ток, протекающий через стенку стебля, представляет собой сумму «прямого» и «обратного» токов. Значение «прямого» тока определено концентрацией токоопределяющего иона на внутренней поверхности стенки стебля, «обратного» – на внешней. Каждый из этих токов, в свою очередь, состоит из тока переноса и тока сквозной проводимости.

Нагрев растительной ткани кормовых трав в основном определяется величиной тока сквозной проводимости, который с увеличением частоты электромагнитных колебаний возрастает. Технологическое действие электрического тока обусловлено током переноса в «прямом» направлении, причем скорость переноса влаги пропорциональна мгновенному его значению. Технологический эффект снижается с увеличением «обратного» тока и тока сквозной проводимости.

Построенная схема замещения отражает наличие трех потенциальных барьеров у стенки стебля: двух граничных, представленных сопротивлением границы раздела фаз «стенка стебля-электролит», и одного внутреннего, представленного непосредственно сопротивлением стенки стебля. С увеличением частоты электромагнитных колебаний сопротивление граничного барьера уменьшается в $(1 + \sqrt{2j\omega C_D W + j\omega C_D R_F})$ раз быстрее сопротивления внутреннего потенциального барьера. При этом должны соблюдаться следующие равенства $R_F = R_{FM}$, $W = W_M$, которые для реальных кормовых трав могут нарушаться.

Заключение

Справедливость построенной схемы замещения стенки стебля, оценка значений сопротивлений граничных и внутреннего потенциальных барьеров, лимитирующих скорость токо-, влагопереноса, требуют экспериментального подтверждения и сопоставления расчетных осциллограмм периодического несинусоидального тока через стенку стебля и токов переходного процесса с эмпирическими.

Библиографический список

1. Багаев, А. А. Результаты экспериментального исследования поляризационных характеристик стенки стебля кормовых трав / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-227-9-85-90. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета – 2023. – № 9 (227). – С. 85-90.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные цепи / Г. И. Атабеков, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков; под редакцией Г. И. Атабекова. – Москва: Энергия, 1970. – Ч. 2. – 232 с. – Текст: непосредственный.
3. Багаев, А. А. Математическая модель влаго- и токопереноса через стенку стебля в про-

цессе электроосмотического обезвоживания растительных материалов / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-226-8-70-77. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 8 (226). – С. 70-77.

4. Багаев, А. А. Гармонический анализ осциллограмм электрического тока через стенку стебля кормовых трав / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-229-11-83-88. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета – 2023. – № 11 (229). – С. 83-88.

5. Багаев, А. А. Математическая модель распределения концентрации токопереноса иона на поверхности стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания / А. А. Багаев. DOI 10.53083/1996-4277-2023-230-12-72-76. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 12 (230). – С. 72-76.

6. Графов, В. Б. Электрохимические цепи переменного тока / В. Б. Графов, Е. А. Укше. – Москва: Наука, 1973. – 128 с. – Текст: непосредственный.

7. Эршлер, Б. В. Исследование кинетики электродных процессов с помощью переменных токов / Б. В. Эршлер. – Текст: непосредственный // Журнал физической химии. – 1948. – Т. 22, вып. 6. – С. 683-695.

8. Лакшминараянах Н. Мембранные электроды / Н. Лакшминараянах; перевод с английского. – Ленинград: Химия, 1979. – 357 с. – Текст: непосредственный.

9. Рубин, А. Б. Биофизика. Биофизика клеточных процессов / А. Б. Рубин. – Москва: Высшая школа, 1987. – Кн. 2. – 303 с. – Текст: непосредственный.

10. Корыта, И. Электрохимия / И. Корыта, И. Дворжак, В. Богачкова; перевод с чешского. – Москва, 1977. – 472 с. – Текст: непосредственный.

11. Карасенко, В. А. Некоторые вопросы электрофизических свойств кормов применительно к обработке электрическим током / В. А. Карасенко. – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов / Белорусская СХА. – Горки, 1983. – Вып. 100. – С. 3-15.

12. Скорчеллетти, В. В. Теоретическая электрохимия / В. В. Скорчеллетти. – Ленинград: Химия, 1974. – 568 с. – Текст: непосредственный.

13. Сканави, Т. И. Физика диэлектриков. Область слабых полей / Т. И. Сканави. – Москва; Ленинград: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1949. – 500 с. – Текст: непосредственный.

14. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва: Энергия, 1968. – 470 с. – Текст: непосредственный.

15. Электромиграционный метод в физико-химических и радиохимических исследованиях / под редакцией В. И. Шведова. – Москва: Атомиздат, 1971. – 288 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Bagaev, A. A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniia poliarizatsionnykh kharakteristik stenki stebliia kormovykh trav / A. A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 9 (227). – S. 85-90. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-227-9-85-90.

2. Atabekov G.I., Timofeev A.B., Khukhrikov S.S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Nelineinye tsepi / pod red. G.I. Atabekova. – Moskva: Energiia, 1970. – Ch. 2. – 232 s.

3. Bagaev, A. A. Matematicheskaia model vlogo- i tokoperenosa cherez stenku stebliia v protsesse elektroosmoticheskogo obezvozhvaniia rastitelnykh materialov / A. A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 8 (226). – S. 70-77. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-226-8-70-77.

4. Bagaev, A. A. Garmonicheskii analiz ostsillogramm elektricheskogo toka cherez stenku stebliia kormovykh trav / A. A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 11 (229). – S. 83-88. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-229-11-83-88.

5. Bagaev A. A. Matematicheskaia model raspredeleniia kontsentratsii tokoperenosiashego iona na poverkhnosti stenki stebliia rastitelnykh materialov v protsessakh elektroosmoticheskogo obezvozhvaniia / A. A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 12 (230). – S. 72-76. DOI 10.53083/1996-4277-2023-230-12-72-76.

6. Grafov V.B., Ukshe E.A. Elektrokhimicheskie tsepi peremennogo toka. – Moskva: Nauka, 1973. – 128 s.

7. Ershler B.V. Issledovanie kinetiki elektrodnykh protsessov s pomoshchiu peremennykh tokov // Zhurnal fizicheskoi khimii. – 1948. – Т. 22. – Vyp. 6. – S. 683-695.

8. Lakshminaraianaikh N. Membrannye elektrody / per. s angl. – Leningrad: Khimiia, 1979. – 357 s.

9. Rubin A.B. Biofizika. Biofizika kletochnykh protsessov. – Moskva: Vysshaya shkola, 1987. – Kn. 2. – 303 s.

10. Koryta I., Dvorzhak I., Bogachkova V. Elektrokimiia / per. s cheshsk. – Moskva: 1977. – 472 s.

11. Karasenko V.A. Nekotorye voprosy elektrofizicheskikh svoistv kormov primenitelno k obrabotke elektricheskim tokom: Sb. nauch. tr. / Belorusskaia SKhA. – Gorki, 1983. – Vyp. 100. – S. 3-15.

12. Skorcelletti V.V. Teoreticheskaia elektrokimiia. – Leningrad: Khimiia, 1974. – 568 s.

13. Skanavi T.I. Fizika dielektrikov. Oblast slabykh polei. – Moskva - Leningrad: Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit-ry, 1949. – 500 s.

14. Lykov A.V. Teoriia sushki. – Moskva: Energiia, 1968. – 470 s.

15. Elektromigratsionnyi metod v fiziko-khimicheskikh i radio-khimicheskikh issledovaniiax / pod red. V.I. Shvedova. – Moskva: Atomizdat, 1971. – 288 s.



УДК 631.363.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-231-1-91-95

В.В. Садов, С.А. Сорокин

V.V. Sadov, S.A. Sorokin

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ЗЕРНА ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛОЖЕНИЯ ОСИ РОТОРА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

INFLUENCE OF GRAIN FEED METHOD RELATIVE TO ROTOR AXIS POSITION ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HAMMER CRUSHER

Ключевые слова: зерновой материал, измельчение, молотковая дробилка, осевая загрузка, радиальная загрузка, кормопроизводство.

Одним из основных процессов при приготовлении комбикормов является измельчение. Это наиболее энергозатратный процесс, в значительной степени определяющий качество готового продукта. Дробилки с горизонтальным валом, т.е. с радиальной подачей, считаются более энергоемкими. Однако эта оценка делалась из удельной энергоемкости, а конструкции дробилок, как правило, отличались друг от друга. Для получения объективных показателей необходимо иметь одинаковые конструкции, но обеспечивающие только радиальную или осевую подачу. Для экспериментальных исследования это требование выполнено, была проведена серия экспериментов для определения энергоемкости, модуля помола и производительности молотковой дробилки. В качестве испытуемых компонентов выступили пшеница и ячмень. Разработанная конструкция является дробилкой закрытого типа с шестигранным корпусом, три грани из которых являются декой, а остальные три – решетом. Проведенные эксперименты показали значимость подачи зерна на исследуемые факторы. Радиальная подача оказалась в более выигрышном положении, поскольку в камере находится меньше материала, что влияет на кинетическую энергию зерна. При этом плотность воздуха также ниже, т.к. нет подсоса из центрального отверстия, эффект вакуумирования кольцевого объема зерновой смеси по периметру молотков выше. Эффект центробежного воздушного насоса в такой схеме минимизирован, в то время осе-

вая подача отсылает нас к конструкции вентиляторов. При радиальной подаче имеем меньшую площадь контакта зерна с поверхностями, что минимизирует силы трения скольжения материала по стали, оказывая влияние на мощность. Модуль помола в исследованиях соответствовал зоотехническим требованиям. Отклонение крупности частиц находилось в пределах 5% и варьировалось в зависимости от исследуемых культур.

Keywords: grain material, crushing, hammer crusher, axial loading, radial loading, feed production.

One of the main processes in the production of formula feeds is crushing. This is the most energy-consuming process and it largely determines the quality of the finished product. Crushers with a horizontal shaft, i.e. with a radial feed are considered more energy-intensive. However, this estimate was made from the specific energy intensity, and the designs of the crushers as a rule differed from each other. To obtain objective indicators, it is necessary to have the same designs but providing only radial or axial feed. For experimental studies, this requirement was met and a series of experiments were conducted to determine the energy intensity, fineness modulus and output capacity of the hammer crusher. Wheat and barley were the tested components. The developed design is a closed-type crusher with a hexagonal body, three faces of which are a deck, and the remaining three are a sieve. The conducted experiments have shown the importance of grain feeding on the studied factors. The radial feed was in a more advantageous position since there was less material in the chamber which affected the kinetic energy