

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-245-3-68-71

А.А. Багаев

A.A. Bagaev

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СТЕНКИ СТЕБЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### METHODOLOGY FOR DETERMINING ELEMENT PARAMETERS OF EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT OF SUBSTITUTION OF STEM WALL OF PLANT MATERIALS

**Ключевые слова:** электротехнология, растительные материалы, стенка стебля, электрическая схема замещения, методика определения сопротивлений.

Определение основных направлений увеличения технологической составляющей и снижение термического действия тока, выявление лимитирующей стадии влагопереноса через стенку стебля растительного происхождения основываются на анализе процесса функционирования эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительного материала путем определения численных значений ее элементов с учетом биофизических процессов в исследуемом объекте. Целью является обоснование методики определения параметров сопротивлений эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительных материалов растительного происхождения. Методика основана на решении системы линейных относительно неизвестных уравнений с 10 неизвестными. Система дополняется до 10 уравнений путем измерения комплексного полного сопротивления стенки стебля на 5 различных частотах тока. Результатом определения неизвестных системы является нахождение значений элементов схемы замещения, независимых от частоты тока. С использованием указанных значений определяются параметры схемы замещения, зависящие от частоты тока. Параметры элементов схемы замещения находятся в функциональной зависимости от частоты тока. Представленная методика позволяет определить параметры элементов схемы замещения стенки стебля растительных материалов и в дальнейшем оценить лимитирующую стадию влаго- и токопе-

реноса через стенку стебля и тем самым обосновать наличие неидеального вентиляющего эффекта стенки стебля, зависящего от частоты тока. Определение параметров сопротивлений схемы замещения стенки стебля также позволяет сформулировать основные направления повышения технологической составляющей тока и уменьшить затраты энергии на неэффективный нагрев обрабатываемого материала.

**Keywords:** electrical technology, plant materials, stem wall, electrical substitution circuit, resistance determination methodology.

Determination of the main directions for increasing the technological component and reducing the thermal effect of the current, identification of the limiting stage of moisture transfer through the stem wall of plant origin are based on the analysis of the process of functioning of the equivalent electrical circuit of substitution of the stem wall of plant material by determining the numerical values of its elements taking into account the biophysical processes in the object under study. The goal is to substantiate the methodology for determining the parameters of resistances of the equivalent electrical circuit of substitution of the stem wall of plant materials. The result of determining the unknowns of the system is to find the values of the elements of the substitution circuit independent of the current frequency. Using these values, the current frequency-dependent parameters of the substitution diagram are determined. The parameters of the substitution diagram elements are functionally dependent on the current frequency. The presented technique allows to determine the parameters of the substitution scheme elements of the

stem wall of plant materials and further to estimate the limiting stage of moisture and current transfer through the stem wall and thus to substantiate the presence of non-ideal valve effect of the stem wall depending on the current frequency. Determination of the parameters of the

stem wall substitution circuit resistances also makes it possible to formulate the main directions for increasing the technological component of the current and reduce energy consumption for inefficient heating of the treated material.

**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

Определение основных направлений увеличения технологической составляющей и снижение термического действия тока, выявление лимитирующей стадии влагопереноса через стенку стебля растительного происхождения основываются на анализе процесса функционирования эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительного материала [1, 2] путем определения численных значений ее элементов с учетом биофизических процессов в исследуемом объекте.

**Целью** является обоснование методики определения параметров сопротивлений эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля материалов растительного происхождения.

**Методика определения параметров элементов схемы замещения.** Для определения параметров элементов схемы замещения стенки стебля, представленной в работе [1], параллельно соединенные сопротивление стадии  $R_M$  и емкость стадии переноса иона через стенку стебля  $C_M$  в «прямом» и «обратном» направлениях

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

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

преобразованы в последовательно включенные сопротивление стадии переноса иона через стенку стебля  $R_{FM}$ , сопротивление и емкость стадии транспортировки иона через растительную мембрану  $R_{WM}$  и  $C_{WM}$ :

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

$$Z = \left[ \frac{\omega}{W_3} + \left[ R_{FM} + \frac{W_M \sqrt{2}}{\sqrt{j\omega}} + \left[ \frac{\sqrt{j\omega}}{R_F \sqrt{j\omega + W\sqrt{2}}} + j\omega C_D \right]^{-1} \right]^{-1} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $C_D$  – емкость двойного электрического тока (ДЭС);

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица [4];

Сопротивление стадии транспортировки иона к межфазной границе  $R_F$ , сопротивление  $R_F$  и емкость  $C_W$  стадии транспортировки иона к межфазной границе представлены в виде:

$$R_F = \frac{RT}{(zF)^2 k^0 c^0}; R_W = \frac{2RT}{(zF)^2 \sqrt{2D\omega} c^0} = \frac{W}{\sqrt{\omega}};$$

$$C_W = \frac{(zF)^2 \sqrt{D} c^0}{RT \sqrt{2\omega}} = \frac{1}{W \sqrt{\omega}}$$

где  $z$  – заряд иона;

$R$  – газовая постоянная;

$D$  – коэффициент диффузии иона;

$c^0$  – концентрация токопереносающего иона;

$k^0$  – коэффициент проницаемости;

$T$  – абсолютная температура;

$F$  – число Фарадея;

$W$  и  $W_M$  – постоянные, являющиеся аналогом постоянной Варбурга [3]: в общем случае

$$W = W_M = \frac{\sqrt{2RT}}{(zF)^2 \sqrt{D} c^0}$$

Постоянные  $W$  и  $W_M$  в процессах измерения, связанных с определением параметров схем замещения растительных материалов, в общем случае могут различаться за счет различия концентраций и зарядов ионов, коэффициентов диффузии. В связи с этим в дальнейшем постоянные  $W$  и  $W_M$  считаются неравными друг другу и учитываются отдельно.

С учетом изложенного полное сопротивление каждой из параллельных ветвей схемы замещения растительной мембраны, описанной в работе [1], запишется следующим образом:

$\omega$  – угловая частота тока,  $c^{-1}$ ;

$W_3 = \omega R_p$ ,  $R_p$  – сопротивление сквозной проводимости.

С учетом обозначения

$$j\omega = x^{-2}, \quad (2)$$

можно записать

$$x = \frac{1-j}{\sqrt{2}} \omega^{-1/2}; x^2 = -j\omega^{-1}; x^3 = -\frac{1+j}{\sqrt{2}} \omega^{-3/2} \text{ и т.д.} \quad (3)$$

В результате раскрытия скобок выражения (1) с учетом (2) и умножения числителя и знаменателя, получившегося после преобразований соотношения на  $x^4/W_3$ , получается:

$$Z = \frac{a_0 + a_1 x \sqrt{2} + a_2 x^2 + a_3 x^3 \sqrt{2}}{b_0 \omega + b_1 + b_2 \omega x \sqrt{2} + b_3 \sqrt{2} + b_4 \omega x^2 + b_5 x^2 + b_6 \omega x^3 \sqrt{2}} \quad (4)$$

где  $b_0 = \frac{R_F R_{FM} C_D}{W_3}; a_0 = R_F R_{FM} C_D;$

$$b_1 = R_F C_D; a_1 = C_D (R_{FM} W + R_F W_M);$$

$$b_2 = \frac{C_D (R_{FM} W + R_F W_M)}{W_3}; a_2 = R_{FM} + 2C_D W_M W + R_F;$$

$$b_3 = W C_D; a_3 = W_M + W; \quad (5)$$

$$b_4 = \frac{R_{FM} + 2C_D W_M W + R_F}{W_3}; b_5 = 1; b_6 = \frac{W_M + W}{W_3}.$$

С другой стороны, импеданс стенки стебля может быть представлен полным комплексным сопротивлением:

$$Z = R_S - j \frac{1}{\omega C_S} = R_S - j X_S. \quad (6)$$

Приравнивание правых частей выражений (4) и (6) с учетом (3) позволяет получить:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 \omega_{nk}^{-1/2} - a_3 \omega_{nk}^{-3/2} - b_0 \omega_{nk} R_{snk} - b_1 R_{snk} - b_2 \omega_{nk}^{1/2} (R_{snk} - X_{snk}) - b_3 \omega_{nk}^{-1/2} (R_{snk} - X_{snk}) + \\ b_4 X_{snk} + b_6 \omega_{nk}^{1/2} (R_{snk} + X_{snk}) = -\omega_{nk}^{-1} X_{snk}; \quad (7) \\ -a_1 \omega_{nk}^{-1/2} - a_2 \omega_{nk}^{-1} - a_3 \omega_{nk}^{-3/2} + b_0 \omega_{nk} X_{snk} + b_1 X_{snk} + b_2 \omega_{nk}^{1/2} (R_{snk} + X_{snk}) + b_3 \omega_{nk}^{-1/2} (R_{snk} + X_{snk}) \\ + b_4 R_{snk} + b_6 \omega_{nk}^{1/2} (R_{snk} - X_{snk}) = -\omega_{nk}^{-1} R_{snk}. \end{aligned}$$

Получена система линейных относительно неизвестных  $a_0 \dots a_3, b_0 \dots b_6$  уравнений с 10 неизвестными. Система (7) должна быть дополнена до 10 уравнений, например, путем измерения комплексного

сопротивления стенки стебля  $Z = R_S - j \frac{1}{\omega C_S} = R_S - j X_S$  на 5 различных частотах. В результате получается 5 пар составляющих импеданса стенки стебля.

Значения индексов  $k$  при неизвестных системы уравнений (7) в «прямом» направлении принимаются равными  $k = 1$ , в «обратном» –  $k = 2$ .

Методы и программные алгоритмы решения систем уравнений известны [5].

Результатом определения неизвестных системы (7) с использованием соотношений (5) является нахождение значений элементов исходной схемы замещения [1], независящих от частоты тока:

$$\begin{aligned} W_3 = \frac{a_3}{b_3}; R_{FM} = (b_0 W_3) / b_1 = a_0 / b_1; W_M = \frac{(b_2 W_3 - R_{FM} b_3)}{b_1}; \\ W = b_6 W_3 - W_M; C_D = b_3 / W; R_F = (b_0 W_3) / (R_{FM} C_D). \quad (8) \end{aligned}$$

Отсюда параметры схемы замещения, зависящие от частоты тока, определяются в соответствии с рекомендациями [3]:

$$\begin{aligned} R_M = \frac{(\sqrt{\omega} R_{FM} + W_M)^2 + W_M^2}{\sqrt{\omega} (R_{FM} \sqrt{\omega} + W_M)}; C_M = \frac{W_M^2}{W_M \sqrt{\omega} [(R_{FM} \sqrt{\omega} + W_M)^2 + W_M^2]}; \\ R_W = \frac{W}{\sqrt{\omega}}; C_W = \frac{1}{W \sqrt{\omega}}; R_p = \frac{W_3}{\omega}. \quad (9) \end{aligned}$$

**Заключение**

Параметры элементов схемы замещения  $R_M$ ,  $C_M$ ,  $R_p$ ,  $C_w$ ,  $R_w$  находятся в функциональной зависимости от частоты тока. Представленная методика позволяет определить параметры элементов схемы замещения стенки стебля растительных материалов и в дальнейшем оценить лимитирующую стадию влаго- и токопереноса через стенку стебля [6, 7], тем самым обосновать наличие неидеального вентиляционного эффекта стенки стебля, зависящего от частоты тока. Определение параметров сопротивлений схемы замещения стенки стебля также позволяет сформулировать основные направления повышения технологической составляющей тока.

**Библиографический список**

1. Багаев, А. А. Электрическая эквивалентная схема замещения стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-231-1-83-91. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (231). – С. 84-91.
2. Багаев, А. А. Исследование работы эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительных материалов / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-242-12-65-72. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 12 (242). – С. 65-72.
3. Графов, Б. М. Электрохимические цепи переменного тока / Б. М. Графов, Е. А. Укше. – Москва: Наука, 1973. – 128 с. – Текст: непосредственный.
4. Арсеньев, Г. Н. Основы теории цепей: практикум: учебное пособие / Г. Н. Арсеньев, И. И. Градов; под редакцией Г. Н. Арсеньева. – Москва: ИД «Форум», ИНФРА-М, 2011. – 336 с. – Текст: непосредственный.
5. Игумнов, Л. А. Методы вычислительной математики. Решение уравнений и систем уравнений: учебное пособие / Л. А. Игумнов,

С. Ю. Литвинчук, Т. В. Юрченко; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. – 100 с. – Текст: непосредственный.

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

7. Рубин, А. Б. Биофизика. Теоретическая биофизика / А. Б. Рубин. – Москва: Высшая школа, 1987. – Кн. 1. – 319 с. – Текст: непосредственный.

**References**

1. Bagaev, A.A. Elektricheskaia ekvivalentnaia skhema zameshcheniia stenki stebliia rastitelnykh materialov v protsessakh elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia / A.A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 1 (231). – S. 83-91. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-231-1-83-91.
2. Bagaev, A.A. Issledovanie raboty ekvivalentnoi elektricheskoi skhemy zameshcheniia stenki stebliia rastitelnykh materialov / A.A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 12 (242). – S. 65-72. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-242-12-65-72.
3. Grafov B.M., Ukshe E.A. Elektrokhimicheskie tsepi peremennogo toka. – Moskva: Nauka, 1973. – 128 s.
4. Arsenev G.N., Gradov I.I. Osnovy teorii tsepei: praktikum: uchebnoe posobie / pod red G.N. Arseneva. – Moskva: ID «Forum»: INFRA-M, 2011. – 336 s.
5. Igumnov L.A. Metody vychislitelnoi matematiki. Reshenie uravnenii i sistem uravnenii: ucheb. posobie / L.A. Igumnov, S.Iu. Litvinchuk, T.V. Iurchenko: Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – N. Novgorod: NNGASU, 2018. – 100 s.
6. Rubin A.B. Biofizika. Biofizika kletochnykh protsessov. – Moskva: Vyssh. shk., 1987. – Kn. 2. – 303 s.
7. Rubin A.B. Biofizika. Teoreticheskaiia biofizika. – Moskva: Vyssh. shk., 1987. – Kn. 1. – 319 s.

