ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15
DOI: 10.53083/1996-4277-2023-230-12-72-76

А.А. Багаев
A.A. Bagaev

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКОПЕРЕНОСЯЩЕГО ИОНА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕНКИ СТЕБЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

MATHEMATICAL MODEL OF CURRENT CARRYING ION CONCENTRATION DISTRIBUTION ON THE STEM WALL SURFACE OF PLANT MATERIALS IN ELECTROOSMOTIC DEHYDRATION PROCESSES

***Ключевые слова**: кормовые травы, электроосмос, энергоэффективность, эквивалентная электрическая схема замещения стенки стебля, концентрация токоопределяющих ионов на межфазной границе.*

Повышение энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания растительных материалов подразумевает увеличение технологической составляющей и уменьшение термической, что наиболее наглядно может быть реализовано на основании анализа электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля. Для построения схемы замещения стенки стебля целесообразно представить процесс транспортировки токоопределяющего иона в виде 2 стадий, на 1-й из которых осуществляется перенос иона через границу раздела фаз «стенка стебля-водный раствор электролита», а на 2-й – перенос иона непосредственно через стенку стебля. Рассматривается первая из указанных стадий переноса. Для обоснования элементного состава, конфигурации и параметров элементов схемы замещения межфазной границы требуется знание распределения концентрации токоопределяющего иона на поверхности стенки стебля. Целью моделирования является получение математического выражения, описывающего распределение концентрации токоопределяющего иона на поверхности стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания кормовых трав. Использованы методы и средства теории электрохимической кинетики, кинетической электропроводности, биофизики, мембранных процессов, классические алгоритмы решений дифференциальных уравнений в частных производных с известными начальными и граничными условиями, включая прямое и обратное преобразование Лапласа. Полученное уравнение дает величину колебаний концентрации ионов у поверхности раздела фаз, если имеет место перенос заряженных частиц к межфазной границе и перенос через нее со скоростью прямо пропорциональной плотности тока через стенки стебля, и является основанием при синтезе эквивалентной схемы замещения стенки стебля соответствующей стадии переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита».

***Keywords:** forage grasses, electroosmosis, energy efficiency, equivalent electrical scheme of stem wall substitution, concentration of current-determining ions at the interphase boundary.*

Increasing the energy efficiency of electroosmotic dehydration of plant materials implies increasing the technological component and reducing the thermal component which may be most clearly realized on the basis of the analysis of the electrical equivalent substitution scheme of the stem wall. To construct the stem wall substitution scheme, it is reasonable to represent the process of current-determining ion transport in the form of two stages the first of which involves ion transport across the interface “stem wall - aqueous electrolyte solution”, and the second stage involves ion transport directly through the stem wall. This paper discusses the first of the mentioned transfer stages. To substantiate the elemental composition, configuration and parameters of the elements of the interfacial boundary substitution scheme, knowledge of the concentration distribution of the current-determining ion on the surface of the stem wall is required. The purpose of modeling is to obtain a mathematical expression describing the distribution of current-determining ion concentration on the stem wall surface of plant materials in the processes of electroosmotic dehydration of forage grasses. Methods and means of the theory of electrochemical kinetics, kinetic electrical conductivity, biophysics, membrane processes, classical algorithms of solutions of partial differential equations with known initial and boundary conditions, including direct and inverse Laplace transform, were used. The obtained equation gives the value of ion concentration fluctuations at the interface if there is a transfer of charged particles to the interphase boundary and transfer through it at a rate directly proportional to the current density through the stem wall and is the basis for synthesizing an equivalent scheme of substitution of the stem wall corresponding to the stage of ion transfer through the interface "stem wall surface - aqueous electrolyte solution".

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 подразумевает увеличение технологической составляющей и уменьшение термической, что наиболее наглядно может быть реализовано на основании анализа электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля. В соответствии с [1] для построения схемы замещения стенки стебля целесообразно представить процесс транспортировки токоопределяющего 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. Рассматривается первая стадия переноса. Для обоснования элементного состава, конфигурации и параметров элементов схемы замещения межфазной границы требуется знание распределения концентрации токоопределяющего иона на поверхности стенки стебля.

Целью является получение математического выражения, описывающего распределение концентрации токоопределяющего иона на поверхности стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания и электроплазмолиза кормовых трав.

Методы и средства представлены основными положениями теории электрохимической кинетики, кинетической электропроводности, биофизики, мембранных процессов, классическими алгоритмами решения дифференциальных уравнений в частных производных с известными начальными и граничными условиями, включая прямое и обратное преобразование Лапласа.

Результаты и обсуждение

Рассматривается перенос электрического тока через растительную мембрану-стенку стебля кормовых трав, окруженную проводником второго рода – водным раствором электролита при наложении на нее внешнего электрического поля [1]. Ионы к границе раздела фаз перемещаются под действием диффузии $D \cdot \nabla^2 \cdot c$ и миграции $D\frac{zF}{RT} div(c \cdot grad\varphi)$. При этом наложение внешнего электрического поля изменяет начальную концентрацию раствора электролита до $c^* = c^o k_1 grad\varphi$, которая остается неизменной и на расстоянии $x \to \infty$ от границы раздела фаз. Изменение концентрации происходит за счет разрушения электростатических связей между ионами дисперсной фазы и окружающими их молекулами воды, вследствие чего часть связанной воды переходит в свободное состояние.

Скорость переноса токоопределяющих ионов через единицу площади стенки стебля в любой момент времени равна i/zF. С другой стороны, эта скорость должна быть равна скорости подвода ионов к границе раздела фаз с помощью диффузии и миграции [2], т.е. величине $\left[D\frac{\partial c}{\partial x} + c^o D\frac{zF}{RT} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right]_{x=0}$.

Тогда дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее изменение концентрации токоопределяющих ионов на поверхности стенки стебля во времени [3], принимает следующий вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 \cdot c + D\frac{zF}{RT} div(c \cdot grad\varphi) \quad (1)$$

с начальным и граничными условиями

$$x > 0; \quad t = 0; \quad c = c^o; \quad (2)$$

$$x \to \infty; \; t > 0; \quad c^* = c^o k_1 grad\varphi; \quad (3)$$

$$x = 0; \; t > 0; \quad -D\frac{\partial c}{\partial x} - c^o D\frac{zF}{RT} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{i}{zF}, \quad (4)$$

где c^o – концентрация токоопределяющих ионов до наложения внешнего электрического поля;

D – коэффициент диффузии иона;

c^* – концентрация иона после наложения электрического поля;

z – заряд иона;

$grad\varphi$ – градиент внешнего электрического поля;

k_1 – коэффициент, учитывающий влияние электрического поля на изменение концентрации иона вследствие дегидратации иона;

F – постоянная Фарадея;

x – расстояние от межфазной границы по нормали;

∇^2 – оператор Лапласа.

В выражении (4) i является плотностью тока переноса («+» и «–» определяют знак «прямого» в направлении от внутренней поверхности стенки стебля к наружной и «обратного» токов соответственно) [4]:

$$i = \pm\frac{I_o}{\pi} + \frac{I_o}{2}sin\omega t \mp \frac{2I_o}{3\pi}cos2\omega t. \quad (5)$$

Решение ведется по первым двум гармоникам и постоянной составляющей тока. Справедливость подобного подхода подтверждается гармоническим анализом экспериментальных осциллограмм тока через стенку стебля [5].

Приняты следующие допущения:

- выражение (1) в соответствии с уточнениями [2] упрощено за счет исключения миграционной составляющей;
- электролит является бинарным.

В случае бинарного электролита условие электронейтральности имеет вид:

$$c^o = \frac{c_1}{z_2} = \frac{c_2}{z_1}, \quad (6)$$

где c_1 – концентрация катионов (например, H⁺);

c_2 – концентрация анионов (например, OH⁺);

c^o – общая концентрация раствора, моль/л.

Сформулированные допущения позволяют на основании (1) получить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \cdot \nabla^2 \cdot c_1; \quad (7)$$
$$\frac{\partial c_2}{\partial t} = D_2 \cdot \nabla^2 \cdot c_2.$$

Результатом подстановки в систему (7) равенств $c_1 = z_2 c^o$ и $c_2 = z_1 c^o$, следующих из (6), получаем:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 \cdot c, \quad (8)$$

где $D = \frac{(z_1+z_2)D_1 D_2}{z_1 D_1 + z_2 D_2}$ – эффективный коэффициент диффузии.

Начальное и граничные условия принимают вид:

$$x > 0;\ t = 0; \quad c = c^o; \quad (9)$$
$$x \to \infty;\ t > 0; \quad c^* = c^o k_1 grad\varphi; \quad (10)$$
$$x = 0; \quad t > 0; \quad -D\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{i}{zF}. \quad (11)$$

Выражение (8) с начальным и граничным условиями (9)-(11) удобно решать с помощью преобразований Лапласа [3].

В результате преобразований относительно $\frac{\partial c}{\partial x}$ граничное условие (11) с учетом (5) принимает вид:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \mp\frac{I_o}{\pi zFD} - \frac{I_o}{2zFD}sin\omega t \pm \frac{2I_o}{3\pi zFD}cos2\omega t =$$
$$= K_1 + K_2 sin\omega t + K_3 cos2\omega t, \quad (12)$$

где $K_1 = \mp\frac{I_o}{\pi zFD}$; (13)

$$K_2 = -\frac{I_o}{2zFD}; \quad (14)$$
$$K_3 = \pm\frac{2I_o}{3\pi zFD}. \quad (15)$$

С учетом начального условия (9) преобразуем отдельные члены уравнения (8) с помощью таблицы операций над оригиналами функций и их изображений [3] следующим образом:

$$L\{c\} = u; \quad (16)$$
$$L\{\partial c/\partial t\} = su - c^*; \quad (17)$$
$$L\{D\,\partial^2 c/\partial x^2\} = D\,d^2u/dx^2, \quad (18)$$

где u – новая независимая переменная;

x – независимая переменная;

s – константа.

В этом случае уравнение (8) принимает вид:

$$su - c^* = D\,d^2u/dx^2, \quad (19)$$

решение которого ищется в виде

$$u = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x} + \frac{c^o}{s}. \quad (20)$$

Характеристическое уравнение выражения (19)

$$Dr^2 - s = 0 \quad (21)$$

имеет корни

$$r_1 = -\sqrt{s/D} < 0; \quad (22)$$
$$r_2 = \sqrt{s/D} > 0. \quad (23)$$

Граничные условия (10) и (11) после преобразований принимают вид:

$$u(\infty) = c^*/s; \quad (24)$$
$$\left[\frac{du}{dx}\right]_{x=0} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2\omega}{(s^2+\omega^2)} + \frac{K_3 s}{(s^2+4\omega^2)}. \quad (25)$$

Согласно условию (10) функция u ограничена при $x \to \infty$ и поэтому в (20) принимаем $C_2 = 0$, так как $r_2 > 0$. Для отыскания C_1 продифференцируем (20) по координате x с учетом $C_2 = 0$:

$$\frac{du}{dx} = C_1\sqrt{\frac{s}{D}}\,exp\left(-x\sqrt{\frac{s}{D}}\right). \quad (26)$$

С учетом (25) при $x = 0$ имеем:

$$\left[\frac{du}{dx}\right]_{x=0} = C_1\sqrt{\frac{s}{D}} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2\omega}{(s^2+\omega^2)} + \frac{K_3 s}{(s^2+4\omega^2)}. \quad (27)$$

Тогда

$$C_1 = \frac{K_1\sqrt{D}}{s\sqrt{s}} + \frac{K_2\omega\sqrt{D}}{(s^2+\omega^2)\sqrt{s}} + \frac{K_3 s\sqrt{D}}{(s^2+4\omega^2)\sqrt{s}}. \quad (28)$$

Следовательно, изображение функции $c(x,t)$ имеет вид:

$$u = \left[\frac{K_1\sqrt{D}}{s\sqrt{s}} + \frac{K_2\omega\sqrt{D}}{(s^2+\omega^2)\sqrt{s}} + \frac{K_3 s\sqrt{D}}{(s^2+4\omega^2)\sqrt{s}}\right] exp\left(-x\sqrt{\frac{s}{D}}\right) + \frac{c^*}{s}. \quad (29)$$

Переход к оригиналам осуществляется с помощью таблиц обратных преобразований Лапласа [6] и с помощью обобщенной теоремы Бореля [7]:

$$L^{-1}\{f(s)g(s)\} = F(t) * G(t) =$$
$$= \int_0^t F(t-\tau)G(\tau)d\tau = \int_0^t F(\tau)G(t-\tau)d\tau,$$

где $F(t) * G(t)$ – свертка функций $F(t)$ и $G(t)$;

$f(s), g(s)$ – изображения функций $F(t)$ и $G(t)$ соответственно.

Промежуточное выражение, описывающее распределение концентраций ионов:

$$c(x,t) = c^* + K_1\sqrt{\frac{D}{\pi t}}exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D}4t}\right) +$$
$$+K_2\sqrt{D}sin\omega t\int_0^t cos\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau -$$
$$-K_2\sqrt{D}cos\omega t\int_0^t sin\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau +$$

$$+K_3\sqrt{D}cos2\omega t\int_0^t cos2\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau -$$
$$-K_3\sqrt{D}sin2\omega t\int_0^t sin2\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau. \quad (30)$$

Правая часть выражения (30) содержит два интеграла с косинусной и синусной подынтегральными составляющими с частотой первой гармоники тока и два аналогичных интеграла с частотой второй гармоники.

Сначала рассмотрим интегралы, содержащие первую гармонику. При больших значениях времени t можно применить подстановку $t = 2\pi n/\omega + \nu$. Тогда по определению интеграла с бесконечным верхним пределом [8] интегралы в полученном выражении (30) при $n \to \infty$ могут быть представлены в виде:

$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty cos\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau; \quad (31)$$
$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty sin\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau. \quad (32)$$

Для отыскания этих интегралов с частотой первой гармоники воспользуемся следующей подстановкой: $\tau^{1/2} = z\sqrt{2\omega}$; $\tau = 2\omega z^2$; $d\tau = 4\omega z dz$. Решение для интеграла с косинусной составляющей первой гармоники:

$$\int_0^\infty\frac{4\omega z}{z\sqrt{2\pi\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{8Dz^2\omega}\right)cos(2z^2\omega^2)dz =$$
$$=\frac{4\omega}{\sqrt{2\pi\omega}}\int_0^\infty exp\left(-\frac{x^2}{8Dz^2\omega}\right)cos(2z^2\omega^2)dz. \quad (33)$$

Обозначив в подынтегральном выражении $p^2 = (x^2/8D\omega)$, под знаком интеграла получили табличное значение [9]. Решение имеет вид

$$\frac{4\omega}{\sqrt{2\pi\omega}}\int_0^\infty exp\left(-\frac{x^2}{8Dz^2\omega}\right)cos(2z^2\omega^2)dz =$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{4D}\right)\left(cos\frac{x^2}{4D} - sin\frac{x^2}{4D}\right). \quad (34)$$

Аналогично находим решение для второго интеграла с синусной составляющей первой гармоники в выражении

$$\frac{4\omega}{\sqrt{2\pi\omega}}\int_0^\infty exp\left(-\frac{x^2}{8Dz^2\omega}\right)sin(2z^2\omega^2)dz =$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{4D}\right)\left(cos\frac{x^2}{4D} + sin\frac{x^2}{4D}\right). \quad (35)$$

Для отыскания интегралов, содержащих подынтегральные функции с частотой второй гармоники

$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty cos2\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau; \quad (36)$$
$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty sin2\omega\tau\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right)d\tau, \quad (37)$$

воспользуемся следующей подстановкой: $\tau^{1/2} = z\sqrt{\omega}$; $\tau = \omega z^2$; $d\tau = 2\omega z dz$.

Решение имеет вид:

для интеграла (36)

$$\int_0^\infty\frac{1}{z\sqrt{\pi\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{4Dz^2\omega}\right)cos(2z^2\omega^2)2\omega z dz =$$
$$=\frac{1}{2\sqrt{\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{2D}\right)\left(cos\frac{x^2}{2D} - sin\frac{x^2}{2D}\right); \quad (38)$$

для интеграла (37)

$$\int_0^\infty\frac{1}{z\sqrt{\pi\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{4Dz^2\omega}\right)sin(2z^2\omega^2)2\omega z dz =$$
$$=\frac{1}{2\sqrt{\omega}}exp\left(-\frac{x^2}{2D}\right)\left(cos\frac{x^2}{2D} + sin\frac{x^2}{2D}\right). \quad (39)$$

С учетом (34), (35), (38), (39) и принимая во внимание (13)-(15), распределение концентрации токоопределяющих ионов на границе разделения фаз «стенка стебля-электролит» запишется:

$$c(x,t) = c^* \mp \frac{I_o}{\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{\pi t}}\cdot exp\left(-\frac{x}{4t\sqrt{D}}\right) -$$
$$-\frac{I_o}{2zFD}\sqrt{\frac{D}{2\omega}}\cdot exp\left(-\frac{x^2}{4D}\right)\left[sin\left(\omega t - \frac{x^2}{4D}\right) - cos\left(\omega t - \frac{x^2}{4D}\right)\right] \pm$$
$$\pm\frac{2I_o}{3\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{4\omega}}\cdot exp\left(-\frac{x^2}{2D}\right)\left[cos\left(2\omega t - \frac{x^2}{2D}\right) - sin\left(2\omega t - \frac{x^2}{2D}\right)\right]. \quad (40)$$

Распределение концентраций иона на поверхности раздела фаз (при x = 0) находится с помощью (40)

$$c(0,t) = c^* \mp \frac{I_o}{\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{\pi t}} -$$
$$-\frac{I_o}{2zFD}\sqrt{\frac{D}{2\omega}}\,[sin(\omega t) - cos(\omega t)] \pm$$
$$\pm\frac{2I_o}{3\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{4\omega}}\,[cos(2\omega t) - sin(2\omega t)]. \quad (41)$$

Разность концентраций ионов на поверхности стенки стебля (x = 0) и в глубине раствора электролита на расстоянии $x \to \infty$ от поверхности раздела фаз:

$$\Delta c = c(0,t) - c^* = \mp\frac{I_o}{\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{\pi t}} -$$
$$-\frac{I_o}{2zFD}\sqrt{\frac{D}{2\omega}}\,[sin(\omega t) - cos(\omega t)] \pm$$
$$\pm\frac{2I_o}{3\pi zFD}\sqrt{\frac{D}{4\omega}}\,[cos(2\omega t) - sin(2\omega t)]. \quad (42)$$

Заключение

Полученное уравнение (41) дает величину колебаний концентрации ионов у поверхности раздела фаз, если имеет место перенос заряженных частиц к межфазной границе и перенос через нее со скоростью $\frac{i}{zF}$ на единицу площади стенки стебля, и является основанием при синтезе эквивалентной схемы замещения стенки стебля соответствующей стадии переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита».

Библиографический список

1. Багаев, А. А. Математическая модель влаго- и токопереноса через стенку стебля в процессе 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.

2. Дамаскин, Б. Б. Введение в электрохимическую кинетику / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий. – Москва: Высшая школа, 1975. – 416 с. – Текст: непосредственный.

3. Корыта, И. Электрохимия / И. Корыта, И. Дворжак, В. Богачкова; перевод с чешского А. Б. Эршлера. – Москва: Мир, 1977. – 472 с. – Текст: непосредственный.

4. 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.

5. 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. – № 11 (229). – С. 83-88.

6. Диткин, В. А. Справочник по операционному исчислению / В. А. Диткин, П. И. Кузнецов. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1951. – 256 с. – Текст: непосредственный.

7. Дидкин, В. А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. А. Дидкин, А. П. Прудников. – Москва: Наука, 1974. – 542 с. – Текст: непосредственный.

8. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, А. А. Семендяев. – Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с. – Текст: непосредственный.

9. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – Москва: Наука, 1971. – 1108 с.

References

1. Bagaev A.A. Matematicheskaia model vlago- i tokoperenosa cherez stenku steblia v protsesse elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia rastitelnykh materialov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 8 (226). – S. 70–77. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-70-77.

2. Damaskin B.B., Petrii O.A. Vvedenie v elektrokhimicheskuiu kinetiku. – Moskva: Vysshaia shkola, 1975. – 416 s.

3. Koryta I., Dvorzhak I., Bogachkova V. Elektrokhimiia / per. s cheshsk. A.B. Ershlera. – Moskva: Mir, 1977. – 472 s.

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

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

6. Ditkin V.A., Kuznetsov P.I. Spravochnik po operatsionnomu ischisleniiu. – Moskva – Leningrad: Gostekhizdat, 1951.

7. Didkin V.A., Prudnikov A.P. Integralnye preobrazovaniia i operatsionnoe ischislenie. – Moskva: Nauka, 1974. – 542 s.

8. Bronshtein I.N., Semendiaev A.A. Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchashchikhsia vtuzov. – Moskva: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. – 544 s.

9. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. Tablitsy integralov, summ, riadov i proizvedenii. – Moskva: Nauka, 1971. – 1108 s.

✦ ✦ ✦

УДК 631.3:621.929.7
DOI: 10.53083/1996-4277-2023-230-12-76-83

И.Я. Федоренко, С.Н. Рыбин, А.В. Штерновский
I.Ya. Fedorenko, S.N. Rybin, A.V. Shternovskiy

СИСТЕМА УДЕРЖАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

VIBRATION PROCESS MACHINE RETENTION SYSTEM IN RESONANT MODE OF OPERATION

Ключевые слова: *вибрационная технологическая машина, резонанс, маятник Капицы, инерционный привод, асинхронный электродвигатель.*

Большинство вибрационных технологических машин (ВТМ) работают в режиме вынужденных колебаний с далеко зарезонансной настройкой. Это связано с тем, что в частотных диапазонах, далеких от резонансной зоны, режим колебаний машины слабо чувствителен к изменению технологической нагрузки и практически не зависит от нелинейности её колебательной системы. Но за это приходится платить нерациональным использованием энергии, так как в системе циркулирует большая реактивная мощность, необходимая для преодоления инерционных сил в зарезонансных и упругих сил в дорезонансных настройках. Один из наиболее эффективных способов повышения производительности, снижения энергозатрат основан на явлении резонанса. Однако из-за недостатков