

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-70-77

А.А. Багаев

A.A. Bagaev

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛАГО- И ТОКОПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ СТЕНКУ СТЕБЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

MATHEMATICAL MODEL OF MOISTURE AND CURRENT TRANSFER THROUGH THE STEM WALL DURING ELECTROOSMOTIC DEHYDRATION OF PLANT MATERIALS

Ключевые слова: электроосмотическое обезвоживание кормовых трав, математическая модель, влаго- и токоперенос через стенку стебля, схема замещения, технологическая составляющая тока.

Актуальной задачей заготовки кормовых трав является сохранение питательных веществ в заготавливаемом корме и снижение затрат на его получение. Эффективным средством достижения указанной задачи являются процессы электротехнологии, рабочий орган которой – сильные электрические поля. В таких электротехнологических процессах, как электроосмос и электроплазмолиз растительный материал является элементом электрической цепи, электрофизические свойства объекта обработки в которой целесообразно моделировать электрической эквивалентной схемой замещения. Элементы, конфигурация схемы замещения и основные направления повышения энергоэффективности электротехнологических процессов могут быть обоснованы на основании анализа физических процессов в стенке стебля кормовых трав. Цель – установление аналитической связи между скоростью влагопереноса и электрическим током через стенку стебля растительной ткани для реализации в электротехнологических процессах сельскохозяйственного назначения. Объектом является стенка стебля кормовых трав (Костер безостый (*Brómus*)). Используются основные положения теории электротехнологии, биофизики, электрохимической кинетики, ионного обмена, электрохимических цепей переменного тока. Математическая модель устанавливает взаимосвязь между процессом влагопереноса через растительную ткань в поперечном направлении при воздействии на нее электрического тока. Рассмотрены стадии переноса тока и влаги через стенку стебля на примере произвольно выделенной в массе травы стенки стебля с учетом

сделанных допущений и предполагаемого распределения электрических потенциалов на межфазной границе. Установлены роль и место технологической составляющей тока через стенку растительной ткани. Совокупность полученных уравнений, отображающих процесс влагопереноса через растительную ткань в поперечном направлении при воздействии на нее электрического тока и определяет предпосылки для синтеза схемы замещения. Установлены пути повышения технологической составляющей тока. Повышение эффективности электротехнологических процессов при обработке растительных материалов (в частности, электроосмотическое обезвоживание) следует рассматривать как процесс увеличения доли технологической составляющей «прямого» тока в общем токе и уменьшения его термического действия.

Keywords: *electroosmotic dehydration of forage grasses, mathematical model, moisture and current transfer through stem wall, substitution scheme, technological component of current.*

A topical issue of harvesting forage grasses is to preserve the nutrients in the harvested forage and to reduce the costs of its production. Effective solution is electrotechnology processes where the working body is strong electric fields. In such electrotechnology processes as electroosmosis and electroplasmolysis the plant material is an element of an electrical circuit, the electrophysical properties of the processed object should be simulated by electrical equivalent substitution circuit. The elements, configuration of the substitution circuit and the main directions of increasing the energy efficiency of electro-osmosis processes may be substantiated by the analysis of physical processes in the stem wall of forage grasses. The research goal is to determine the analytical relationship of the rate of moisture

transfer and electric current through the stem wall of plant tissue for implementation in the electro-technological processes of agricultural purposes. The research target is the stem wall of forage grasses (*Bromus inermis*). The main provisions of the theory of electrotechnology, biophysics, electrochemical kinetics, ion exchange, and alternating current electrochemical circuits were used. The mathematical model establishes the relationship of the process of moisture transfer through the plant tissue in the transverse direction when the electric current is applied to it. The stages of current and moisture transfer through the stem wall by the example of the stem wall, arbitrarily singled out in the mass of grass, are considered taking into account the assumptions made and the assumed distribution of

electric potentials on the interphase boundary. The role and place of the technological component of the current through the plant tissue wall has been determined. The combination of the equations derived reflecting the process of moisture transfer through the plant tissue in the transverse direction under the influence of the electric current determines the preconditions for the synthesis of the substitution scheme. The ways of increasing the technological component of current have been determined. Improving the efficiency of electrotechnology processes for plant material treatment (in particular, electroosmotic dehydration) should be regarded as a process of increasing the share of the technological component of "direct" current in the total current and reducing its thermal effect.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev7102@mail.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev7102@mail.ru.

Введение

Актуальной задачей заготовки кормовых трав является сохранение питательных веществ в заготавливаемом корме и снижение затрат на его получение: чем выше скорость обезвоживания, тем выше качество готового продукта. Эффективным средством достижения указанной задачи являются процессы электротехнологии, рабочий орган которой – сильные электрические поля, а объектом обработки – растительные структуры. В таких электротехнологических процессах, как электроосмос и электроплазмолиз [1, 2] растительный материал является элементом электрической цепи, электрофизические свойства объекта обработки в которой целесообразно моделировать электрической эквивалентной схемой замещения. Элементы, конфигурация схемы замещения и основные направления повышения энергоэффективности электротехнологических процессов могут быть обоснованы на основании анализа физических процессов в стенке стебля кормовых трав.

Цель – установление аналитической связи между скоростью влагопереноса и электрическим током через стенку стебля растительной ткани для реализации в электротехнологических процессах сельскохозяйственного назначения.

Объект

На рисунке 1 показан поперечный разрез стебля Костра безостого (лат. *Brómus*). В результате воздействия на подобную структуру электрического тока определенной величины наступает процесс электроплазмолиза, сопровождающийся отслоением протопласта клетки

от ее оболочки, сжатием протоплазмы, разрушением оболочки клетки и выходом внутриклеточной жидкости в межклеточное пространство.



Рис. 1. Поперечный разрез стебля Костра безостого (лат. *Brómus*) (фото автора. Масштаб 100:1)

К подобной системе применены следующие допущения:

1. Рассматриваемую систему можно сравнить с губкой, поры (капилляры) которой оказываются заполненными внутриклеточной жидкостью (водным раствором электролита).

В результате стенка стебля, поперечный разрез которой показан на рисунке 1, где отчетлива видна ее гетерогенная структура в направлении от внешней поверхности к внутренней – ионит [3].

2. С точки зрения исследования влаго- и электропроводности стенка стебля рассматривается как макроембрана, внутренняя и наружная поверхность которой окружена электр-

тролитом одного и того же качественного состава.

3. Допущения п. 1 и 2 позволяют использовать общие положения теории ионного обмена [3-6].

4. Носителями заряда в растительной ткани кормовых трав являются ионы белков, целлюлозы [7], диссоциированных молекул кислот, солей и воды (ионы OH^- и H^+) [8], определяющих электропроводность ткани. Сравнительно большие значения электропроводности характерны для ионов H^+ ($349,8 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$) и OH^- ($198,3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$) [9]. Ионами OH^- и H^+ переносится 60-70% электрического тока через стенку стебля [10].

5. В рассматриваемом случае, когда стенка стебля окружена водным раствором электролита как с внешней поверхности (эпидерма), так и

с внутренней (паренхима), на границе раздела формируется двойной электрический слой (ДЭС). Предполагаемое распределение электрических потенциалов на межфазных границах представлено на рисунке 2.

6. Перенос заряженной частицы осуществляется в два этапа: на первом ион транспортируется к границе раздела фаз «стенка стебля (со стороны эпидермы или со стороны паренхимы) – электролит» и переносится через нее. На втором этапе ион переносится непосредственно через стенку стебля (рис. 3, 4).

Предполагается, что ион под воздействием внешнего электрического поля транспортируется из приэлектродного пространства к межфазной границе и переносится через стенку стебля в направлении, перпендикулярном ее поверхности.

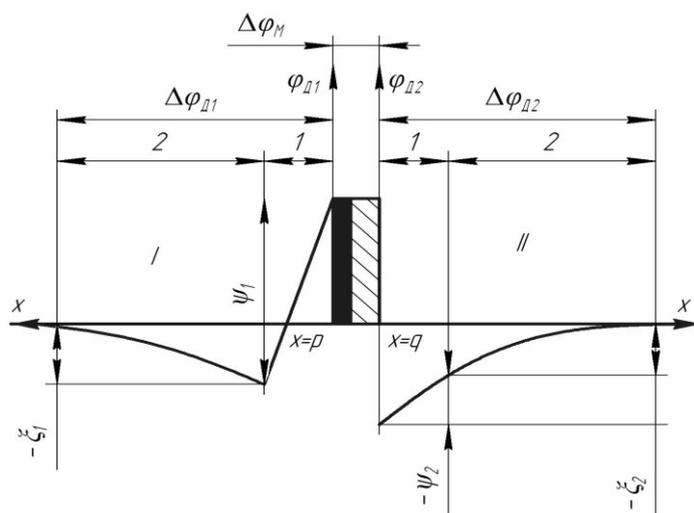


Рис. 2. Предполагаемые профили распределения потенциалов в двойных электрических слоях (ДЭС):
I – со стороны внешней поверхности стенки стебля (эпидерм),
II – со стороны внутренней поверхности (паренхима), ξ – электрокинетический потенциал
диффузной части ДЭС, ψ – потенциал плотной части ДЭС;
1 – плотная часть ДЭС, 2 – диффузная часть ДЭС

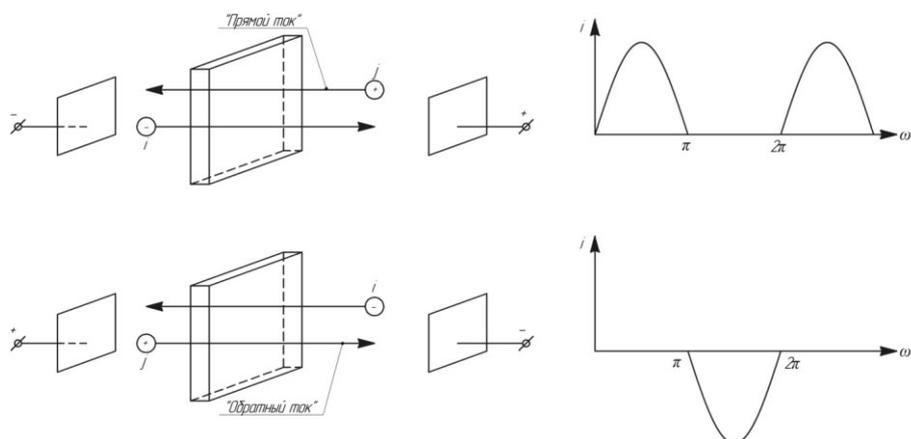


Рис. 3. Схема переноса заряженных частиц и тока через стенку стебля при различной полярности внешнего электрического поля

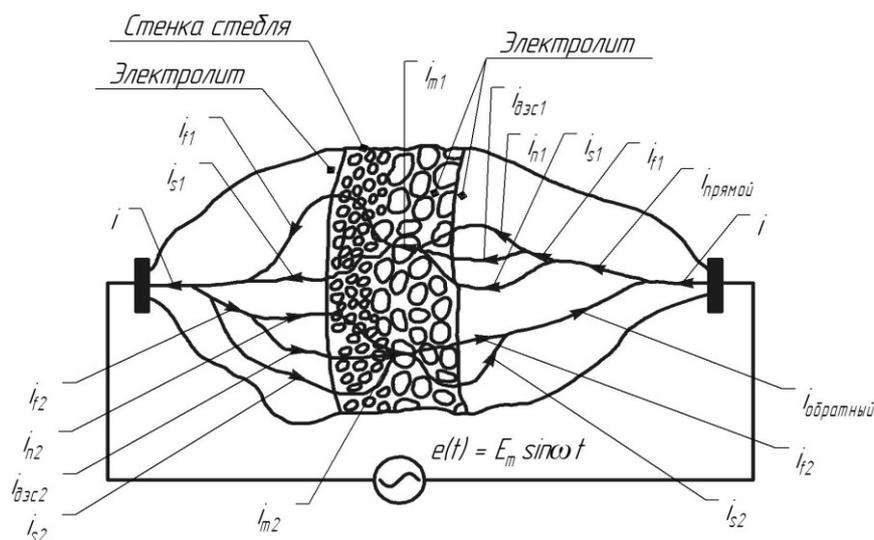


Рис. 4. Схематическое изображение протекания тока и переноса ионов через стенку стебля и его составляющие при наложении синусоидального напряжения:

i_F – технологическая составляющая; i_S – ток сквозной проводимости;

i_{Π} – ток переноса иона через межфазную границу;

$i_{ДЭС}$ – ток зарядки двойного электрического слоя ДЭС; i_M – ток через стенку стебля

Методы и средства

Используются основные положения электротехнологии сельскохозяйственного назначения, биофизики, электрохимии, электрохимической кинетики, ионного обмена, электрохимических цепей переменного тока, электротехники.

Математическая модель. Рассмотрим каждую стадию переноса на примере произвольно выделенной в массе травы стенки стебля с учетом сделанных допущений и предполагаемого распределения электрических потенциалов на межфазной границе.

Перенос иона через межфазную границу. Известное выражение для тока через межфазную границу «стенка стебля-электролит» [6, 9], равно сумме «прямого» тока, протекающего в направлении от паренхимы к эпидерму $i_{\text{ПР}}$ и «обратного» $i_{\text{ОБ}}$, протекающего в обратном направлении, имеет вид:

$$i = zF(v_{\text{ПР}} - v_{\text{ОБ}}), \quad (1)$$

где z – заряд токоопределяющего иона;

F – число Фарадея, $F=9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль;

$v_{\text{ПР}}, v_{\text{ОБ}}$ – линейная скорость влагопереноса в «прямом» и «обратном» направлении соответственно.

Тогда в соответствии с [10] выражение для плотности тока, A/m^2 , через стенку стебля имеет вид:

$$i = zF\{\bar{k} \cdot \exp[(-E_{on} - \Delta G(1 - \alpha) - zF(1 - \alpha)\Delta\varphi_{m1})/RT] \cdot (c^o - \Delta c) - \bar{k} \cdot \exp[(-E_{on} - \Delta G\alpha) - zF\alpha\Delta\varphi_{m2})/RT](c^o + \Delta c)\}, \quad (2)$$

где \bar{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;

$(c^o - \Delta c), (c^o + \Delta c)$ – 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, составляющей нормаль к поверхности ионообменной поверхности во внешнем электрическом поле.

Выражения для определения $\Delta\varphi_{m1}$, $\Delta\varphi_{m2}$ в соответствии с рисунком 2 имеют вид

$$\Delta\varphi_{m1,2} = \Delta\varphi_{D1,2} + \beta \left(\pm \frac{\Delta U}{\pi} + \frac{\Delta U}{2} \sin\omega t \mp \frac{2\Delta U}{3\pi} \cos 2\omega t \right), \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_{D1} = \psi_1 - \xi_1$, $\Delta\varphi_{D2} = \psi_2 - \xi_2$ – разности электрических потенциалов между паренхимой и эпидермой стенки стебля и точкой, расположенной на расстоянии $x \rightarrow \infty$ по оси, составляющей нормаль к поверхности ионообменной поверхности во внешнем электрическом поле соответственно (рис. 2);

ψ_1, ψ_2 – потенциалы плотной части двойного электрического слоя (ДЭС) с соответствующих поверхностей стенки стебля;

ξ_1, ξ_2 – потенциалы диффузных частей соответствующих поверхностей стенки стебля;

β – доля падения напряжения переменного напряжения на межфазной границе;

ΔU – амплитуда переменного напряжения.

Изменение свободной энергии связывания молекул воды с ионом ΔG в выражении (2) происходит за счет разрушения во внешнем электрическом поле электростатических связей между ионом дисперсной фазы кормовых трав с молекулами воды и уменьшения вследствие этого радиуса дисперсной фазы [5, 10].

Изменение свободной энергии связывания воды, Дж/моль, описывается уравнением Борна:

$$\Delta G = \frac{(ze)^2 N_A}{4\pi \epsilon_0 r} \left(1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right), \quad (4)$$

где N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;

ze – заряд иона, Кл;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

r – радиус гидратированного иона, м;

ϵ – диэлектрическая проницаемость электролита, Ф/м.

Необходимость определения концентраций ионов на межфазных границах и коэффициентов переноса затрудняет практическое использование выражения (2) для определения скорости переноса влаги через стенку стебля. Поэтому в расчетах целесообразно применять выражение для линейной скорости влагопереноса

$$v = \frac{E\xi\epsilon}{4\pi\eta}, \quad (5)$$

где ξ – электрокинетический потенциал диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС) (рис. 2);

ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость, для воды $\epsilon = 692,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

E – напряженность внешнего электрического поля, В/м; η – вязкость воды, $\eta = 89,5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹·кг·с⁻¹.

Результатом приравнивания правых частей выражений (2) и (5) и предварительного деления (2) на zF является:

$$v = \frac{E\xi\epsilon}{4\pi\eta} = \delta \vec{k} \exp \left[\frac{(-E_{on} - \Delta G(1 - \alpha) - zF(1 - \alpha)\Delta\varphi_{m1})}{RT} \right] (c^o - \Delta c) - \delta \vec{k} \exp [(-E_{on} - \Delta G\alpha) - zF\alpha\Delta\varphi_{m2}) / RT] (c^o + \Delta c), \quad (6)$$

где δ – коэффициент пропорциональности, $\delta = 18,0156$.

Перенос иона через паренхиму. Ток переноса непосредственно через стенку стебля (рис. 4) [5]

$i_{M1} = zD\nabla c - |z|Fuc\nabla\varphi = -zD\nabla c - \kappa\nabla\varphi$, (7)
где D – коэффициент диффузии, см²/с;

∇c – градиент концентрации токоопределяющего иона между внешней и внутренней поверхностями стенки стебля по координате x , $\nabla c = dc/dx$ моль/см²;

u – электролитическая подвижность иона, см/с;

$\nabla\varphi$ – градиент (напряженность) внешнего электрического поля, В/см;

κ – удельная электропроводность, Ом⁻¹·см²·моль⁻¹.

В то же время поток влаги в капиллярно-пористых коллоидных материалах q , кг/(м²·с) при их обезвоживании определяется молекулярным переносом пара q_{Π} и переносом жидкости $q_{Ж}$ и обусловлен возникновением в материале градиентов температуры $\nabla\theta$, град/м, и влажосодержания ∇U , кг/(кг/м) [12]:

$$q = q_{\Pi} + q_{\text{Ж}} = -a_m \rho_0 \nabla \theta \delta - a_m \rho_0 \nabla U, \quad (8)$$

где δ – термоградиентный коэффициент, кг/(кг/град.);

a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/с;

ρ_0 – плотность сухого вещества, кг/м³.

Коэффициент диффузии влаги a_m является кинетическим коэффициентом L в уравнении линейности $i = LX$, где i – плотность потока влаги; X – движущая сила переноса, и определяет интенсивность влагопереноса внутри материала. Коэффициент диффузии влаги учитывает все виды переноса [12], включая электроосмотический, и является интегральной оценкой комплексного воздействия процессов, сопровождающих электроосмотическое обезвоживание влажных сельскохозяйственных материалов, в число которых входят силы электроосмоса, осмоса, пьезоэлектрического напора, трения и др.

В связи с этим следует отметить, что уравнение передачи линейного многополюсника $I_i = \sum_{k=1}^m Y_{ik} U_{ik}$ при $i=1,2,\dots,m$, где I_i – ток, U_{ik} – напряжение на зажимах многополюсника; Y_{ik} – коэффициенты проводимости аналогично с основным законом неравновесной термодинамики $i = LX$. Аналогия является неслучайной, так как в обоих случаях рассматриваются линейные системы, а взаимодействия токов внутри многополюсника (стенки стебля) являются частным случаем взаимодействия необратимых процессов в стационарном состоянии [13]. При этом токи играют роль потоков, напряжение – роль обобщенных сил, а коэффициенты пропорциональности – частный случай кинетических коэффициентов, что подтверждается сравнением уравнений (7) и (8).

Кинетические коэффициенты L (в том числе и a_m) уравнения линейности $i = LX$ определяют интенсивность влагопереноса в обрабатываемом материале. Кинетические коэффициенты находятся в функциональной связи с химическим составом материала, его структурой, плотностью, влажностью, температурой [12] и зависят от методов и параметров обработки (в частности от напряженности электрического поля).

В связи с этим знание зависимости коэффициента диффузии влаги от параметров электрического поля необходимо для обоснования выбора оптимальных параметров обработки, тем более что коэффициент a_m определяет степень обезвоживания кормовых трав при их электроосмотическом обезвоживании.

Результаты и обсуждение

Совокупность уравнений (1)-(8) представляет собой набор формальных соотношений, отображающих процесс влагопереноса через растительную ткань в поперечном направлении при воздействии на нее электрического тока, т.е. является математической моделью влаго- и токопереноса через стенку стебля. Анализ математической модели свидетельствует о следующем:

1. Технологическое действие электрического тока при взаимодействии с растительной тканью определяется выражением (6) и заключается в способности тока переводить влагу, связанную с дисперсной фазой электростатическими силами в свободное состояние, и придавать ей целенаправленное движение, а также обуславливает интенсивность влагопереноса.

2. Электрический ток при наложении на стенку стебля синусоидального напряжения состоит из двух составляющих: «прямого» тока, пересекающего стенку стебля в направлении от внутренней ее поверхности к внешней, и «обратного», направление протекания которого противоположно.

3. Технологическое действие электрического тока может быть усилено путем увеличения «прямого» тока и уменьшения «обратного», что, в частности, может быть обеспечено увеличением напряженности электрического поля. При этом скорость влагопереноса через стенку стебля зависит от характера отклонения разности потенциалов $\Delta\varphi_m$ между точкой на поверхности стенки стебля и точкой в глубине электролит, расположенной от нее на расстоянии $x \rightarrow \infty$ по оси, перпендикулярной поверхности ионообменной поверхности.

Увеличение напряженности внешнего электрического поля сопровождается возрастанием отклонения разности потенциалов от равновесного значения. При этом «прямой» ток увеличивается, если электрокинетический потенциал ξ_2 – одна из составляющих межфазной разности потенциалов (рис. 2) – возрастает, что сопровождается уменьшением энергии активации переноса в «прямом» направлении на величину ΔG .

«Обратный» ток уменьшается, если потенциал ξ_1 убывает (рис. 2). В этом случае увеличение отклонения межфазной разности потенциалов от равновесного значения увеличивает

энергию активации переноса в «обратном» направлении на величину ΔG .

Указанный характер изменения ξ -потенциала во внешнем электрическом поле обуславливает неидеальную одностороннюю проводимость стенки стебля (неидеальный вентильный эффект).

4. Увеличение напряженности внешнего электрического поля сопровождается уменьшением радиуса гидратированного иона дисперсной фазы, что приводит к уменьшению связывания воды с ионом на величину ΔG . Вследствие этого на величину ΔG уменьшаются затраты энергии при последующей искусственной сушке кормовых трав.

5. «Прямой» и «обратный» токи, в свою очередь, также состоят из двух составляющих (рис. 4): тока i_F (i_{F1}, i_{F2}), протекающего непосредственно по растительной ткани кормовых трав, и тока i_S (i_{S1}, i_{S2}), замыкающего через водный раствор электролита, который заполняет межклеточное пространство растительной ткани, и идущего в основном на нагрев. Однако повышение температуры обрабатываемого материала приводит к уменьшению энергии активации переноса. При этом увеличиваются как «прямой» ток, так и «обратный», уменьшая энергоэффективность обработки в целом. Поэтому с целью исключения неэффективных затрат энергии на увеличение «обратного» тока, снижающего скорость переноса влаги, необходимо уменьшать составляющие токов, идущие на нагрев.

Выводы

Повышение эффективности электротехнологических процессов при обработке растительных материалов (в частности, электроосмотическое обезвоживание) следует рассматривать как процесс увеличения доли технологической составляющей «прямого» тока в общем токе, так как именно общим током можно управлять в процессе реализации той или электротехнологии.

Полученная математическая модель физических процессов влаго- и токопереноса может быть положена в основу синтеза электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля, на основании анализа которой предоставляются возможности для дальнейшего определения путей повышения технологической составляю-

щей тока и уменьшения его термического действия.

Библиографический список

1. Багаев, А. А. Электротехнология: учебное пособие / А. А. Багаев, А. И. Багаев, Л. В. Куликова. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с. – EDN: QKYL MV. – Текст: непосредственный.
2. Куликова, Л. В. Электротехнология / Л. В. Куликова, А. А. Багаев. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 372 с. – EDN: ZRZPAW. – DOI <https://doi.org/10.23681/602402>. – Текст: непосредственный.
3. Гельферих, Ф. Иониты. Основы ионного обмена / Ф. Гельферих; перевод с немецкого. – Москва: ИИЛ, 1962. – 583 с. – Текст: непосредственный.
4. Дамаскин, Б. Б. Введение в электрохимическую кинетику / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий; под редакцией А. Н. Фрумкина. – Москва: Высшая школа, 1975. – 416 с. – Текст: непосредственный.
5. Корыта, И. Электрохимия / И. Корыта, И. Дворжак, В. Богачкова; перевод с чешского. – Москва: 1977. – 472 с. – Текст: непосредственный.
6. Скорчеллетти, В. В. Теоретическая электрохимия / В. В. Скорчеллетти. – Ленинград: Химия, 1974. – 568 с. – Текст: непосредственный.
7. Гладких, Ж. Биофизика / Ж. Гладких; перевод с французского. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 72 с. – Текст: непосредственный.
8. Байер, В. Биофизика. Введение в физический анализ свойств и функций живых систем / В. Байер; перевод с немецкого. – Москва: ИИЛ, 1962. – 430 с. – Текст: непосредственный.
9. Девис, С. Электрохимический словарь / С. Девис, А. Джеймс; перевод с английского. – Москва: Мир, 1979. – 281 с. – Текст: непосредственный.
10. Дытнерский, Ю. И. Ионный транспорт через обратноосмотические мембраны в процессе электрофильтрации / Ю. И. Дытнерский, Ю. В. Карлин. – Текст: непосредственный // Коллоидный журнал. – 1986. – Т. 48, № 5. – С. 880-885.
11. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон; перевод с английского. – Москва: Мир, 1979. – 568 с. – Текст: непосредственный.
12. Гинзбург, А. С. Массообменные характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – Москва: Легкая и пищевая про-

мышленность, 1982. – 280 с. – Текст: непосредственный.

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

References

1. Bagaev A.A., Bagaev A.I., Kulikova L.V. Elektrotehnologiya: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 320 s. – EDN: QKYL MV.

2. Kulikova L.V. Elektrotehnologiya / L.V. Kulikova, A.A. Bagaev. – Moskva; Berlin: Direkt-Media, 2021. – 372 s. – EDN: ZRZPAW. – DOI: <https://doi.org/10.23681/602402>.

3. Gelferikh F. Ionity. Osnovy ionnogo obmena / per. s nem. – Moskva: IIL, 1962. – 583 s.

4. Damaskin B.B., Petrii O.A. Vvedenie v elektrokhimicheskuiu kinetiku / pod red. A.N. Frumkina. – Moskva: Vyssh. shk., 1975. – 416 s.

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

6. Skorchel'ti V.V. Teoreticheskaiia elektrokimiia. – Leningrad: Khimiia, 1974. – 568 s.

7. Gladkikh Zh. Biofizika / per. s fran. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 72 s.

8. Baier V. Biofizika. Vvedenie v fizicheskii analiz svoistv i funktsii zhivykh sistem / per. s nem. – Moskva: IIL, 1962. – 430 s.

9. Devis S., Dzheims A. Elektrokhimicheskii slovar / per. s angl. – Moskva: Mir, 1979. – 281 s.

10. Dytnerskii Iu.I., Karlin Iu.V. Ionnyi transport cherez obratnoosmoticheskie membrany v protsesse elektrofiltratsii // Kolloidnyi zhurnal. – 1986. – T. 48. – No. 5. – S. 880-885.

11. Adamson A. Fizicheskaiia khimiia poverkhnostei / per. s angl. – Moskva: Mir, 1979. – 568 s.

12. Ginzburg A.S., Savina I.M. Massoobmennye kharakteristiki pishchevykh produktov. – Moskva: Legkaia i pishchevaia promyshlennost, 1982. – 280 s.

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



УДК 697.946

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-77-83

**А.Г. Возмилов, Р.Ю. Илимбетов,
С.А. Панишев, А.А. Лисов**
A.G. Vozmilov, R.Yu. Ilimbetov,
S.A. Panishev, A.A. Lisov

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В МАЛООБЪЕМНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ АПК

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROSTATIC FILTER FOR AIR PURIFICATION IN SMALL-SCALE FACILITIES OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, малообъемные помещения, электростатический фильтр, фильтрация воздуха, математическое моделирование, очистка воздушной среды, MatLab/Simulink.

Рассмотрены вопросы очистки воздушной среды малообъемных помещений с повышенными требованиями к чистоте воздуха, к которым относятся ветеринарные и зоотехнические лаборатории, вычислительные центры и т.п. Воздушный бассейн агропромышленных комплексов загрязнен различными вредными веществами: пыль, аммиак, сероводород, микроорганизмы. В связи с этим малообъемные помещения, находящиеся на территории комплексов, необходимо защищать от вентиляционных выбросов животноводческих помещений. Известно, что в данных помещени-

ях рекомендуется использовать для очистки воздушной среды от аэрозоля электростатические фильтры. Рассмотрены конструкция и принцип работы электростатического фильтра. Осаждение частиц происходит за счет сил электрического поля, которые действуют на естественный заряд частиц аэрозоля. Эффективность очистки электростатического фильтра зависит от ряда конструктивных и технологических параметров, таких как длина зоны осаждения, расстояние между осадительными электродами, скорость воздушного потока через фильтр, диэлектрических свойств частиц и их размера. На основании аналитических зависимостей, описывающих процессы очистки воздуха от аэрозолей, была разработана математическая модель в программном пакете MatLab/Simulink, позволяющая рассчитывать эффективность электростатического фильтра. Для проверки адекватности математической модели