

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-242-12-65-72

А.А. Багаев

A.A. Bagaev

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СТЕНКИ СТЕБЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### STUDY ON THE PERFORMANCE OF EQUIVALENT ELECTRICAL SUBSTITUTION CIRCUIT OF THE STEM WALL OF PLANT MATERIALS

**Ключевые слова:** стенка стебля кормовых трав, электротехнология, эквивалентная электрическая схема замещения.

Одним из объектов электротехнологии как науки являются стебельчатые материалы растительного происхождения. Электрический ток в соответствии с известным определением представляет собой «рабочий орган» электротехнологии, например, в таких процессах, как электроосмотическое обезвоживание кормовых трав, делигнификация соломы, предпосевная обработка семян и др. Разработанная электрическая эквивалентная схема стенки стебля растительных материалов состоит из «прямой» (в направлении протекания тока от паренхимы к эпидермису) и «обратной» (в направлении протекания тока от эпидермиса к паренхиме) ветвей и учитывает наличие у стенки стебля неидеального полупроводникового эффекта по току и по влагопереносу. Целью работы является упрощение синтезированной эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительных материалов и исследование режимов ее работы. Для упрощения анализа работы полученной схемы замещения произведено ее преобразование. Упрощение реализовано отдельно для «прямой» и «обратной» ветвей схемы замещения. Установлено, что «прямой» и «обратный» токи через стенку стебля являются разрывными функциями времени, амплитуды которых зависят от параметров элементов схемы замещения стенки стебля. Следовательно, ток в неразветвленной части схемы замещения, являющийся суммой токов в «прямой» и «обратной» ветвях, является периодическим несинусоидальным с учетом наличия неидеального вентильного эффекта стенки стебля и не может иметь периодическое продолжение функции тока с периодом  $2\pi$  на интервале времени, отличном от  $(0, 2\pi)$ . С целью описания функции тока через стенку стебля в любой мо-

мент времени целесообразно определить параметры стенки замещения и описать ток через стенку стебля с помощью гармонического ряда.

**Keywords:** forage grass stem wall, electrotechnology, equivalent electrical substitution scheme.

Stem materials of plant origin are among the research targets of electrotechnology as a science. The electric current according to the known definition represents the “working organ” of electrotechnology, for example, in such processes as electroosmotic dehydration of forage grasses, delignification of straw, pre-sowing treatment of seeds, etc. The developed electrical equivalent circuit of the stem wall of plant materials consists of “forward” (in the direction of current flow from the parenchyma to the epidermis) and “reverse” (in the direction of current flow from the epidermis to the parenchyma) branches and takes into account the presence of non-ideal semiconductor effect regarding current and moisture transfer in the stem wall. The research goal is to simplify the synthesized equivalent electrical substitution circuit of the stem wall of plant materials and to study its operation modes. In order to simplify the analysis of the obtained substitution circuit operation, its transformation is performed. Simplification is realized separately for the “forward” and “reverse” branches of the substitution circuit. It is found that the “forward” and “reverse” currents through the stem wall are discontinuous functions of time which amplitudes depend on the parameters of the elements of the substitution scheme of the stem wall. Consequently, the current in the unbranched part of the substitution scheme which is the cumulative current in the “forward” and “reverse” branches, is periodic non-sinusoidal taking into account the presence of a non-ideal valve effect of the stem wall, and cannot have a periodic continuation of the current function with a period of  $2\pi$  at a time interval other than  $(0, 2\pi)$ . Therefore, in order to describe the cur-

rent function through the stem wall at any time, it is reasonable to determine the substitution wall parameters and

describe the current through the stem wall using a harmonic series.

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

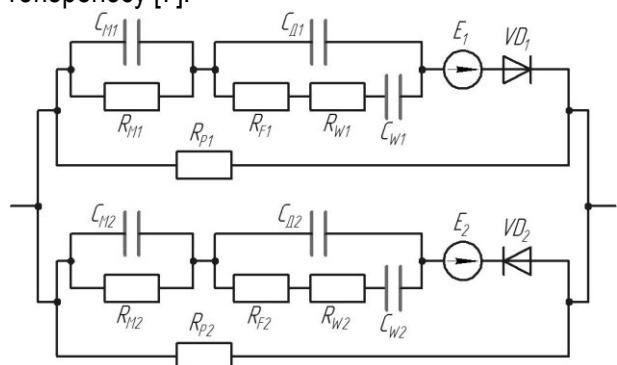
**Bagaev Andrey Alekseevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

**Введение**

Одним из объектов электротехнологии как науки являются стебельчатые материалы растительного происхождения. Электрический ток в соответствии с известным определением представляет собой «рабочий орган» электротехнологии в таких процессах, как электроосмотическое обезвоживание кормовых трав, делигнификация соломы, предпосевная обработка семян и др. [1].

В перечисленных технологических процессах растительный материал является элементом электрической цепи. При этом важно снизить непроизводительные затраты электрической энергии на нагрев обрабатываемого материала и усилить его технологическое действие, что удобно сделать на основе анализа функционирования эквивалентной электрической схемы замещения.

Аналитические и экспериментальные исследования, изложенные в работах [2-5], позволили обосновать эквивалентную электрическую схему замещения стенки стебля растительных материалов [6], представленную на рисунке 1. Указанная схема замещения отражает факт наличия у стенки стебля растительных материалов вентильного эффекта как по току, так и по влагопереносу [7].



**Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения стенки стебля растительных материалов [5]**

**Целью** является упрощение синтезированной эквивалентной электрической схемы заме-

щения стенки стебля растительных материалов и исследование режимов ее работы.

**Преобразование схемы замещения**, изображенной на рисунке 1, производится с целью максимального ее упрощения. Упомянутое упрощение осуществляется с помощью известных выражений для сложения последовательно и параллельно соединенных сопротивлений и емкостей [8], а также с использованием соотношений для преобразования участка цепи, содержащего последовательно включенные сопротивление и емкость, в участок цепи с параллельным их соединением [9].

Последовательность операций преобразования «прямой» (в направлении протекания тока от паренхимы к эпидермису) и «обратной» (в направлении протекания тока от эпидермиса к паренхиме) ветвей схемы замещения представлена в таблице.

Результатом упрощения каждой из двух ветвей исходной схемы замещения является параллельное соединение емкости и сопротивления. На рисунке 2 а представлена «прямая», а на рисунке 2 б «обратная» ветви схемы замещения стенки стебля после преобразований при наложении на нее синусоидального напряжения.

Проведенные преобразования позволяют приступить к рассмотрению работы схемы замещения.

**Исследование работы схемы замещения.**

Сначала рассмотрим «прямую» ветвь схемы замещения (рис. 2 а). В соответствии с законами Кирхгофа имеем:  $U_{D1} + U_{C9} = e(t) + E_0$ ;  $U_{C9} = i'_1 R_1$ ;  $i' = i'_1 + i'_2$ . Диод  $VD_1$  открывается в момент  $\omega t_1$ , когда напряжение на нем  $U_{D1} = e(t) + E_0 - U_{C9}$ , увеличиваясь, становится равным нулю.

Когда диод откроется, напряжение на емкости  $C_{C9}$  становится равным  $U_{C9} = e(t) + E_0 = E_m \sin \omega t_1 + E_0$  (рис. 3 в). Как только диод откроется, ток через емкость  $C_{C9}$  станет изменяться по закону (рис. 3 д)

$$i'_2 = C_{C9} \left( \frac{dU_{C9}}{dt} \right) = C_{C9} \left( \frac{d(e(t)+E_0)}{dt} \right) = \\ = C_{C9} (d(E_m \sin \omega t) / dt) = \omega C_{C9} E_m \cos \omega t.$$

**Последовательность упрощения эквивалентной электрической схемы замещения стенки стебля растительных материалов**

Преобразование «прямой» ветви схемы замещения		
№	Схема замещения	Условные обозначения элементов схемы (обозначение на рисунке 1)
1	2	3
1		<p><math>C_{C1}</math> – емкость стенки стебля (<math>C_{M1}</math>);  <math>R_{R1}</math> – сопротивление стенки стебля (<math>R_{M1}</math>);  <math>C_{C2}</math> – емкость двойного электрического слоя ДЭС (<math>C_{Д1}</math>);  <math>R_{R2}</math> – сопротивление стадии переноса иона через границу раздела фаз (<math>R_{F1}</math>);  <math>R_{R3}, C_{C3}</math> – сопротивление и емкость стадии транспортировки иона к границе раздела фаз (<math>R_{W1}, C_{W1}</math>);  <math>R_{R4}</math> – сопротивление сквозному току (<math>R_{P1}</math>)</p>
2		$R_{R6} = R_{R2} + R_{R3};$ $C_{C4} = ((1 + \beta_1^2)R_{R1})/\beta_1^2;$ $R_{R5} = \frac{R_{R1}}{(1 + \beta_1^2)}$ <p>где <math>\beta_1 = \omega C_{C1} R_{R1}</math></p>
3		$C_{C5} = (C_{C3}\beta_2^2)/(1 + \beta_2^2);$ $R_{R7} = R_{R6}/(1 + \beta_2^2),$ <p>где <math>\beta_2 = 1/(\omega C_{C3} R_{R6})</math></p>
4		$C_{C6} = C_{C2} + C_{C5}$
5		$R_{R8} = C_{C6}/(1 + \beta_3^2);$ $C_{C7} = ((1 + \beta_3^2)C_{C6})/\beta_3^2,$ <p>где <math>\beta_3 = \omega C_{C6} R_{R7}</math></p>
6		$C_{C8} = (C_{C7} C_{C4})/(C_{C7} + C_{C4});$ $R_{R9} = R_{R5} + R_{R8}$
7		$C_{C9} = (C_{C8}\beta_4^2)/(1 + \beta_4^2);$ $R_{N1} = R_{R9}(1 + \beta_4^2),$ <p>где <math>\beta_4 = 1/(\omega C_{C8} R_{R9})</math></p>
8		$R_{N2} = (R_{N1}R_{R4})/(R_{N1} + R_{R4})$

1	2	3
Преобразование «обратной» ветви схемы замещения		
1		<p><math>C_{K1}</math> – емкость стенки стебля (<math>C_{M2}</math>);  <math>R_{M1}</math> – сопротивление стенки стебля (<math>R_{M2}</math>);  <math>C_{K2}</math> – емкость двойного электрического слоя ДЭС (<math>C_{Д2}</math>);  <math>R_{M2}</math> – сопротивление стадии переноса иона через границу раздела фаз (<math>R_{F2}</math>);  <math>R_{M3}, C_{K3}</math> – сопротивление и емкость стадии транспортировки иона к границе раздела фаз (<math>R_{W2}; C_{W2}</math>);  <math>R_{M4}</math> – сопротивление сквозному току (<math>R_{P2}</math>)</p>
2		<p><math>R_{M6} = R_{M2} + R_{M6}</math>;  <math>C_{K4} = ((1 + \beta_5^2)R_{M1})/\beta_5^2</math>;  <math>R_{M5} = R_{M1}(1 + \beta_5^2)</math>,          где <math>\beta_5 = \omega C_{K1} R_{M1}</math></p>
3		<p><math>C_{K5} = (C_{K3}\beta_6^2)/(1 + \beta_6^2)</math>;  <math>R_{M7} = R_{M6}/(1 + \beta_6^2)</math>,          где <math>\beta_6 = 1/(\omega C_{K3} R_{M6})</math></p>
4		<p><math>C_{K6} = C_{K2} + C_{K5}</math></p>
5		<p><math>R_{M8} = C_{K6}/(1 + \beta_7^2)</math>;  <math>C_{K7} = ((1 + \beta_7^2)C_{K6})/\beta_7^2</math>,          где <math>\beta_7 = \omega C_{K6} R_{M7}</math></p>
6		<p><math>C_{K8} = (C_{K7} C_{K4})/(C_{K7} + C_{K4})</math>;  <math>R_{M9} = R_{M5} + R_{M8}</math></p>
7		<p><math>C_{K9} = (C_{K8}\beta_8^2)/(1 + \beta_8^2)</math>;  <math>R_{F1} = R_{M9}(1 + \beta_8^2)</math>,          где <math>\beta_8 = 1/(\omega C_{K8} R_{M9})</math></p>
8		<p><math>R_{F2} = (R_{F1} R_{M4})/(R_{F1} + R_{M4})</math></p>

Ток через нагрузку изменяется по закону (рис. 3 г)  $i_1' = U_{C9}/R_{N2} = (E_m/R_{N2})\sin\omega t + E_0/R_{N2}$ .

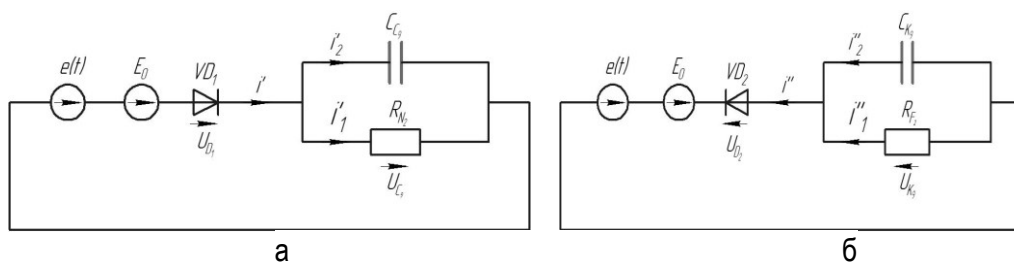


Рис. 2. Ветви схемы замещения стенки стебля после упрощения при наложении синусоидального напряжения: а – прямая; б – обратная

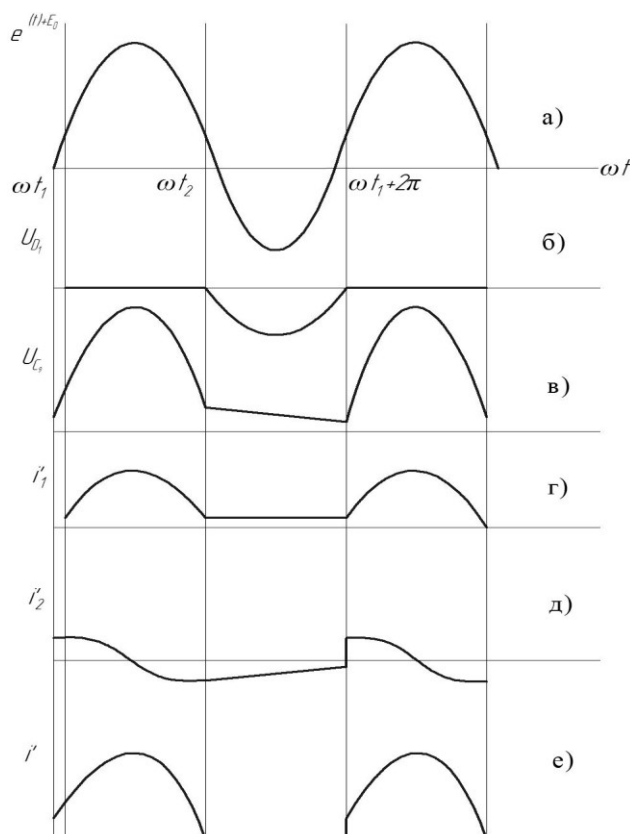


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений «прямой» ветви схемы замещения на рисунке 2 а

Ток через диод (рис. 3 е)  $i' = i'_1 + i'_2 = (E_m/R_{N2})\sin\omega t + E_0/R_{N2} + \omega C_{C9}E_m \cos\omega t$  в момент  $\omega t_2$  становится равным нулю, и диод закрывается. Значение  $\omega t_2$  найдем из условия

$$(E_m/R_{N2})\sin\omega t_2 + E_0/R_{N2} + \omega C_{C9}E_m \cos\omega t_2 = 0.$$

Тогда  $(E_m/R_{N2})\sin\omega t_2 + \omega C_{C9}E_m \cos\omega t_2 = -\frac{E_0}{R_{N2}}$ ;

$$\sqrt{(E_m/R_{N2})^2 + (\omega C_{C9}E_m)^2} \sin(\omega t_2 + \arctg \omega C_{C9}R_{N2}) = -E_0/R_{N2};$$

$$\omega t_2 = \arcsin \left[ \frac{E_0}{R_{N2} \sqrt{\left(\frac{E_m}{R_{N2}}\right)^2 + (\omega C_{C9}E_m)^2}} \right] - \arctg(\omega C_{C9}R_{N2}) + \pi.$$

В интервале от  $\omega t_2$  до  $(2\pi + \omega t_1)$  емкость  $C_{C9}$  разряжается на  $R_{N2}$  (рис. 3 в), и напряжение на ней изменяется во времени по закону:

$U_C = E_0 + E_m \sin\omega t_2 \exp(-(\omega t - \omega t_2)/(\omega C_{C9}R_{N2}))$ . При этом  $i'_2 = -i'_1$  (рис. 3 г, д). Момент открытия диода определяется из условия  $e(t) + E_0 = 0$ . Тогда  $E_m \sin\omega t_1 = E_0$ ;  $\omega t_1 = \arcsin(-E_0/E_m)$ .

Рассмотрим работу «обратной» ветви схемы замещения (рис. 2 б). В момент  $\omega t_3$  открывается диод  $VD_2$ , когда напряжение на нем  $-U_{D2} = e(t) + E_0 + U_{K9}$  становится равным нулю (рис. 4 б). Когда диод откроется, напряжение на емкости  $C_{K9}$  становится равным  $-U_{K9} = e(t) + E_0 = E_m \sin \omega t_3 + E_0$  (рис. 4 в). Как только диод откроется, ток через емкость станет изменяться по закону (рис. 4 д):

$i_2'' = C_{K9}(dU_{K9}/dt) = C_{K9}(d(e(t) + E_0)/dt) = C_{K9}(d(E_m \sin \omega t)/dt) = \omega C_{K9} E_m \cos \omega t$ , а ток через сопротивление  $R_{F2}$  (рис. 4 г) – по закону  $i_1'' = U_{K9}/R_{F2} = (E_m/R_{F2}) \sin \omega t + E_0/R_{F2}$ . Ток через диод (рис. 4 е)  $i'' = i_1'' + i_2'' = (E_m/R_{F2}) \sin \omega t + E_0/R_{F2} + \omega C_{K9} E_m \cos \omega t$  в момент  $\omega t_4$  становится равным нулю, и диод закрывается. Значение  $\omega t_2$  найдем из условия  $(E_m/R_{F2}) \sin \omega t_4 + E_0/R_{F2} + \omega C_{K9} E_m \cos \omega t_4 = 0$ . Тогда

$$\omega t_4 = \arcsin \left[ \frac{E_0}{R_{F2} \sqrt{\left(\frac{E_m}{R_{F2}}\right)^2 + (\omega C_{K9} E_m)^2}} \right] - \arctg(\omega C_{K9} R_{F2}) + 2\pi.$$

В интервале от  $\omega t_4$  до  $(2\pi + \omega t_3)$  емкость  $C_{K9}$  разряжается на  $R_{F2}$  (рис. 4 в), и напряжение на ней изменяется во времени по закону:

$$U_{K9} = E_0 + E_m \sin \omega t_4 \exp(-(\omega t - \omega t_4)/(\omega C_{K9} R_{F2})).$$

При этом  $i_2'' = -i_1''$  (рис. 4 г, д). Момент открытия диода  $VD_2$  определяется из условия  $-U_{K9} = e(t) + E_0 = 0$ . Тогда  $\omega t_3 = \arcsin(-E_0/E_m) + \pi$ .

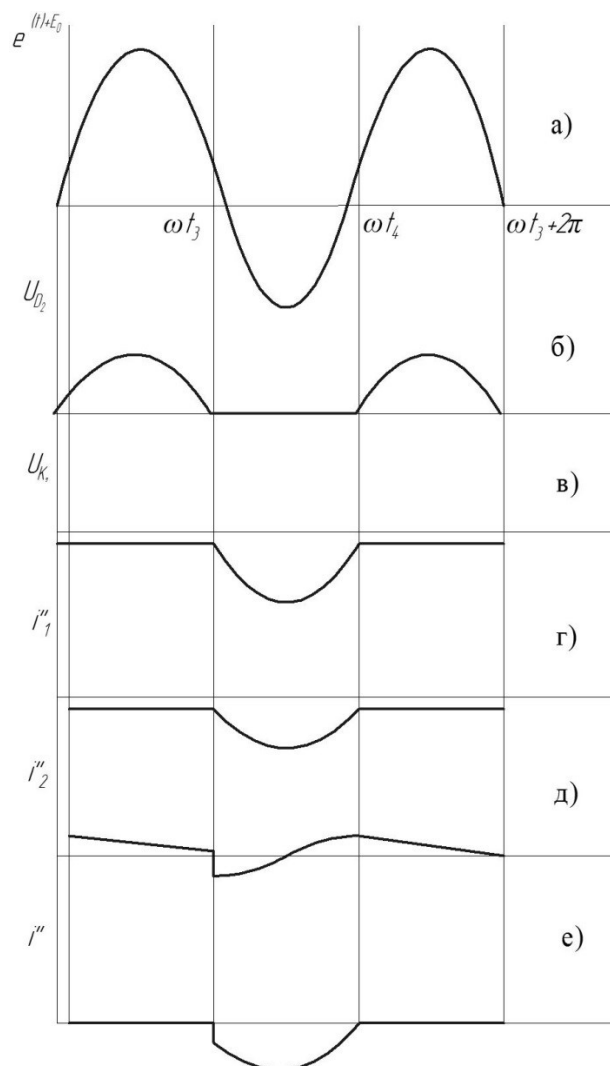


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений «обратной» ветви схемы замещения на рисунке 2 б

Таким образом, ток  $i$  в неразветвленной части схемы замещения, изображенной на рисунке 1, имеет вид:

$$i = i' + i'' = (E_m/R_{N2})\sin\omega t_5 + E_0/R_{N2} + \omega C_{C9}E_m\cos\omega t_5 + \\ + (E_m/R_{F2})\sin\omega t_6 + E_0/R_{F2} + \omega C_{K9}E_m\cos\omega t_6,$$

где  $\omega t_1 \leq \omega t_5 \leq (\omega t_2 + \pi)$ ;

$$(\omega t_3 + \pi) \leq \omega t_6 \leq (\omega t_4 + 2\pi).$$

### Заключение

В соответствии с рисунками 3 и 4 «прямой» и «обратный» токи через стенку стебля являются разрывными функциями времени: «прямой» ток определен только в интервале от  $\omega t_1$  до  $\omega t_2$ , а «обратный» – в интервале  $\omega t_3$  до  $\omega t_4$ . Кроме того, амплитуды токов, претерпевающих разрыв во времени, требуют определения численных значений параметров элементов схемы замещения. Следовательно, ток в неразветвленной части схемы замещения, являющийся суммой токов в «прямой» и «обратной» ветвях, является периодическим несинусоидальным с учетом наличия неидеального вентильного эффекта стенки стебля и не может иметь периодическое продолжение функции тока с периодом  $2\pi$  на интервале времени, отличном от  $(0, 2\pi)$ . С целью описания функции тока через стенку стебля в любой момент времени целесообразно определить параметры стенки замещения и описать ток через стенку стебля с помощью гармонического ряда.

### Библиографический список

- Куликова, Л. В. Электротехнология: учебное пособие / Л. В. Куликова, А. А. Багаев. – Москва; Берлин: Директ-Медиа Пабблишинг, 2021. – 373 с. – Текст: непосредственный.
- 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.
- 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.
- 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.

- Багаев, А. А. Математическая модель распределения концентрации токопереносающего 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.

- 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. 83-91.

- Багаев, А. А. Вентильный эффект переноса влаги через стенку стебля кормовых трав / А. А. Багаев. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-233-3-68-74. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (233). – С. 68-74.

- Теоретические основы электротехники: учебник для вузов / А. А. Багаев, Л. В. Куликова, Э. В. Кузьмин [и др.]. – Барнаул: ГИПП Алтай, 2000. – 772 с. – Текст: непосредственный.

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

### References

- Kulikova L.V., Bagaev A.A. Elektrotehnologija: uchebnoe posobie / L.V. Kulikova, A.A. Bagaev. – Moskva-Berlin: Direkt-Media Publishing, 2021. – 373 s.
- Bagaev, A.A. Matematicheskaja model vlago- i tokoperenosa cherez stenkku steblija v protsesse elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia

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.

3. Bagaev, A.A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniia polarizatsionnykh 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.

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. Matematicheskaiia model raspredeleniia kontsentratsii tokoperenosiashego iona na poverkhnosti stenki stebliia rastitelnykh materialov v protsessakh elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia / 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. Bagaev, A.A. Elektricheskaiia ekvivalentnaiia 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.

7. Bagaev, A.A. Ventilnyi effekt perenosa vlagi cherez stenku stebliia kormovykh trav / A.A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 3 (233). – S. 68-74. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-233-3-68-74.

8. Bagaev A.A. i dr. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: uchebnik dlia vuzov / A.A. Bagaev, L.V. Kulikova, E.V. Kuzmin, V.N. Larionov, V.D. Mikheev, O.K. Nikolskii. – Barnaul: GIPP Altai, 2000. – 772 s.

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



УДК 631.3

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-242-12-72-77

С.Ю. Булатов, В.Н. Нечаев, А.Г. Сергеев, А.Е. Шлыков

S.Yu. Bulatov, V.N. Nechaev, A.G. Sergeev, A.E. Shlykov

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ ЗЕРНА ДКР-1 В РЕЖИМЕ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ МАТЕРИАЛА

### EVALUATION OF PERFORMANCE OF UPGRADED DKR-1 GRAIN HAMMER CRUSHER IN METERED MATERIAL SUPPLY MODE

**Ключевые слова:** дозатор, дробилка, зерно, измельчение, исследование, окно, подача, показатели работы, пылевидная фракция, энергозатраты.

Зерно является одним из самых важных ингредиентов в рационе сельскохозяйственных животных и птицы. Нормативными документами регламентирована его предварительная правильная подготовка перед скормливанием. В России в отличие от стран Европы и Америки зерно измельчают в дробилках. При этом подача зерна реализуется либо транспортирующими машинами непосредственно в дробилки с принудительной подачей, либо за счет разреженного воздуха по воздуховодам непосредственно из бурта. В современных комбикормовых цехах зерно хранится в силосах и подается к дробилкам через дозаторы посредством транспортирующих машин. Нами предлагается упростить конструкцию, исключив из цепочки транспортирующее оборудование, и подавать зерно из дозатора непосред-

ственно в воздуховод дробилки с вентилятором. Однако такие дробилки обладают высокими энергозатратами, а в готовом продукте содержится большое количество пылевидной фракции. Нами выдвинута гипотеза, что улучшить данные показатели можно за счет совершенствования конструкции дробилки путем выполнения в зарешетном пространстве дополнительных выгрузных окон. Целью работы является исследование влияния площади разгрузочных зарешетных окон на показатели работы молотковой дробилки при дозированной подаче материала. Исследовали влияние площади разгрузочных зарешетных окон, выполненных в перегородке дробилки, разделяющей ротор и вентилятор, и предназначенных для эвакуации измельченного продукта из дробилки. Определялись энергетические и качественные показатели дробилки при постоянной подаче зерна ячменя через дозатор. В результате проведенных исследований процесса измельчения зерна при его дозированной подаче в дробилке ДКР-1 выяв-