

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-233-3-68-74

А.А. Багаев

A.A. Bagaev

## ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ ЧЕРЕЗ СТЕНКУ СТЕБЛЯ КОРМОВЫХ ТРАВ

### VALVE ACTION OF MOISTURE TRANSFER THROUGH THE STEM WALL OF FORAGE GRASSES

**Ключевые слова:** стенка стебля кормовых трав, электроосмос, скорость влагопереноса, вентильный эффект.

Вопросы повышения технологической составляющей тока в процессах электроосмотического обезвоживания кормовых трав и электроплазмолиза с целью повышения энергоэффективности перечисленных электротехнологических процессов является актуальной научно-практической задачей. Результаты исследования основаны на выводах предшествующих научных работ автора, посвященных обоснованию электрической эквивалентной схемы замещения стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания. Целью является подтверждение гипотезы наличия неидеального выпрямительного эффекта стенки стебля кормовых трав по влагопереносу. Используются теоретические и экспериментальные методы и средства электрохимической кинетики. Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие положения. Стенка стебля обладает неидеальной односторонней проводимостью по отношению к переносимому через нее под действием внешнего электрического поля водному раствору электролита. Скорость влагопереноса в «прямом» направлении – от внутренней поверхности стенки стебля к внешней – с увеличением частоты электромагнитных колебаний уменьшается. Электрокинетический потенциал, являющийся составной частью поверхностного потенциала стенки стебля, с увеличением напряженности электрического поля увеличивается в «прямом» направлении и уменьшается в «обратном». В связи с этим увеличение электрокинетического потенциала в «прямом» направлении сопровождается возрастанием потенциала на внутренней поверхности стенки стебля, а уменьшение электрокинетического потенциала в «обратном» направлении – увеличением потенциала со стороны внешней поверхности. Указанный характер изменения поверхностных потенциалов обуславливает увеличение разности потенциалов между внешней и внутренней поверхностями стенки стебля по мере воз-

растания напряженности внешнего электрического поля независимо от направления протекания тока, что является причиной существования неидеального вентильного эффекта стенки стебля как по току, так и по влагопереносу.

**Keywords:** forage grass stem wall, electroosmosis, moisture transfer rate, valve action.

The issues of increasing the technological component of current in the processes of electroosmotic dehydration of forage grasses and electroplasmolysis in order to increase the energy efficiency of the listed electro-technological processes is an urgent scientific and practical task. The research findings are based on the conclusions of the author's previous scientific works devoted to the substantiation of the electrical equivalent substitution scheme of the stem wall of plant materials in the processes of electroosmotic dehydration. The goal is to confirm the hypothesis of non-ideal rectification effect of forage grass stem wall on moisture transfer. Theoretical and experimental methods and means of electrochemical kinetics were used. The analysis of the obtained results allows formulating the following statements. The stem wall has non-ideal one-sided conductivity in relation to the electrolyte aqueous solution carried through it under the action of an external electric field. The rate of moisture transfer in the "forward" direction - from the inner surface of the stem wall to the outer one - decreases with increasing frequency of electromagnetic oscillations. The electrokinetic potential which is a component of the surface potential of the stem wall increases with increasing electric field strength in the "forward" direction and decreases in the "reverse" direction. In this connection, an increase in the electrokinetic potential in the "forward" direction is accompanied by an increase in the potential on the inner surface of the stem wall while a decrease in the electrokinetic potential in the "reverse" direction is accompanied by an increase in the potential on the outer surface. This character of surface potential change causes increase in the potential difference between the outer and inner surfaces of the stem wall as the external electric field strength

increases regardless of the direction of current flow, which is the reason for the existence of a non-ideal valve effect of

the stem wall both in terms of current and moisture transfer.

**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

Вопросы повышения технологической составляющей тока в процессах электроосмотического обезвоживания кормовых трав и электроплазмолиза с целью повышения энергоэффективности перечисленных электротехнологических процессов является актуальной научно-практической задачей.

В работе [1] выдвинута гипотеза о существовании неидеального выпрямительного эффекта стенки стебля кормовых трав как по току, так и по влагопереносу, обусловленному анизотропной структурой растительной ткани.

Доказан полупроводниковый эффект стенки стебля по отношению к электропроводности, исследованы ВАХ стенки стебля [2].

Установлен гармонический анализ осциллограмм электрического тока через стенку стебля кормовых трав, позволивший обосновать математическую модель распределения концентрации токопереносящего иона на поверхности стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания [5, 6]. Проведенные исследования позволили

обосновать электрическую эквивалентную схему замещения стенки стебля растительных материалов в процессах электроосмотического обезвоживания.

Если существует вентиляльный эффект стенки стебля по току, следовательно, он должен сопровождаться аналогичным эффектом по влагопереносу.

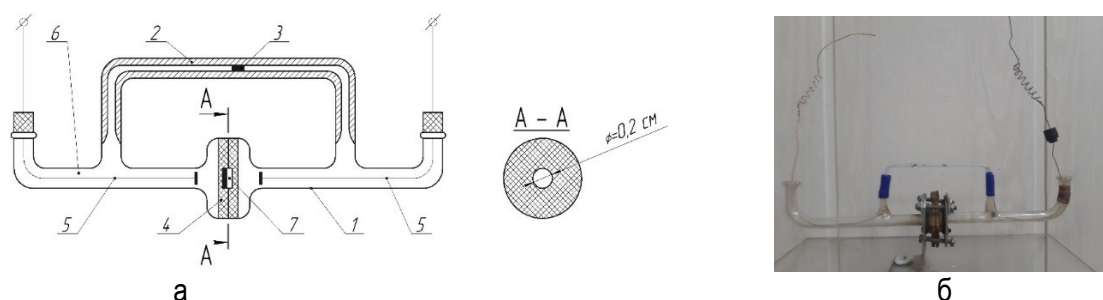
**Целью** является подтверждение гипотезы о существовании неидеального выпрямительного эффекта стенки стебля кормовых трав по влагопереносу.

### Методы и средства

Использованы теоретические и экспериментальные методы и средства электрохимической кинетики.

### Результаты и обсуждение

Для изучения влияния анизотропных структурных и электрических свойств стенки стебля кормовых трав на закономерности влагопереноса через нее использована ячейка [3, 4], представляющая собой две стеклянные изогнутые трубки 1 (рис. 1).



**Рис. 1. Устройство электрокинетической ячейки (а) и общий вид (б) для исследования влагопереноса через стенку кормовых трав:**

**1 – стеклянные коленообразные трубки; 2 – капилляр (радиус  $r = 0,05$  см); 3 – пузырек воздуха; 4 – уплотнительные прокладки; 5 – электроды; 6 – водный раствор электролита; 7 – стенка стебля**

Ячейка заполняется водным раствором электролита  $KCl$  так, чтобы в капилляре 2 оставался пузырек воздуха 3. Между уплотнительными прокладками 4, имеющими калиброванное отверстие диаметром 2 мм, помещается исследуемая стенка стебля, полученная путем разрезания вдоль образующей стебля растения. Поперечный разрез стенки стебля показан в [1]. На

электроды 5 подается в соответствии с планом эксперимента постоянное или переменное электрическое напряжение.

Отбор проб производился по методике, описанной в [2]. Для каждого последующего измерения использовался новый образец. Повторность измерений девятикратная.

При подаче напряжения на электроды 5 водный раствор электролита за счет сил электроосмоса переносится через стенку стебля из одной части ячейки в другую. При этом, в силу того, что ячейка полностью заполнена электролитом, пузырек воздуха 3 в капилляре 2 под воздействием гидравлического давления начинает перемещаться в направлении, противоположном направлению переноса электролита через стенку стебля. Измеряя линейную скорость дви-

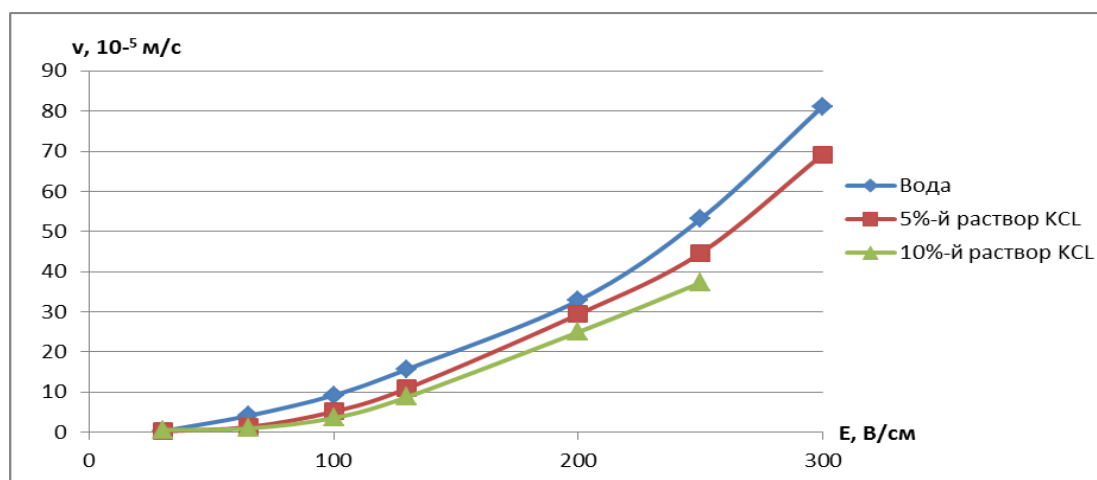
жения пузырька воздуха в капилляре, определяли скорость переноса водного раствора электролита через стенку стебля  $v$ . Результаты измерений в «прямом» направлении – от внутренней поверхности эпидерма к внешней – представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Результаты измерений в «обратном» направлении – от внешней поверхности эпидерма к внутренней – представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 1

**Результаты измерения скорости влагопереноса и расчета электрокинетического потенциала в «прямом» направлении – от внутренней поверхности эпидерма к внешней**

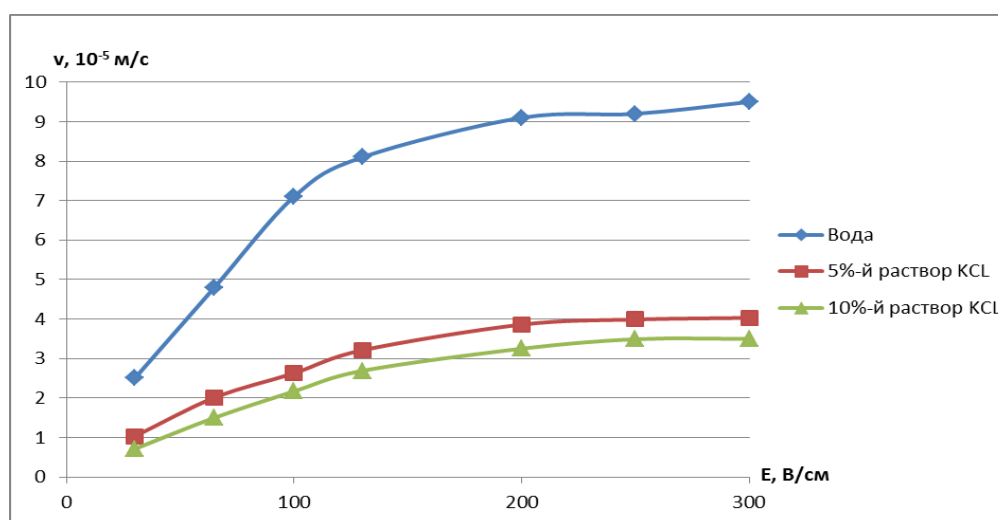
Раствор электролита	Напряженность электрического поля $E$ , В/см	Электрокинетический потенциал $\xi$ , мВ	Скорость влагопереноса $v$ , $10^{-5}$ м/с
Вода	30	2,00	0,29
	65	12,99	4,08
	100	19,06	9,21
	130	25,00	15,70
	200	33,95	32,80
	250	43,97	53,10
	300	56,03	81,20
5%-ный раствор KCL	30	1,42	0,20
	65	4,13	1,29
	100	10,60	5,13
	130	17,40	10,93
	200	30,40	29,37
	250	36,90	44,62
	300	47,70	69,20
10%-ный раствор KCL	30	1,06	0,54
	65	2,98	0,94
	100	7,32	3,54
	130	13,90	8,76
	200	25,80	24,94
	250	30,70	37,20
	300	35,60	51,54



**Рис. 2. Зависимости скорости влагопереноса  $v$  через стенку стебля водного раствора KCl от его концентрации и напряженности постоянного электрического поля в «прямом» направлении – от внутренней поверхности эпидерма к внешней**

**Результаты измерения скорости влагопереноса и расчета электрокинетического потенциала в «обратном» направлении – от внешней поверхности эпидерма к внутренней**

Раствор электролита	Напряженность электрического поля $E$ , В/см	Электрокинетический потенциал $\xi$ , мВ	Скорость влагопереноса $v$ , $10^{-5}$ м/с
Вода	30	17,7	2,5
	65	15,3	4,8
	100	13	7,1
	130	11	8,1
	200	8,4	9,1
	250	7,7	9,2
	300	6,6	9,5
5%-ный раствор KCL	30	7,14	1,03
	65	6,4	2,01
	100	5,45	2,63
	130	5,1	3,21
	200	3,99	3,86
	250	3,3	3,99
	300	2,78	4,03
10%-ный раствор KCL	30	4,92	0,71
	65	4,78	1,5
	100	4,49	2,17
	130	4,28	2,69
	200	3,36	3,25
	250	2,89	3,49
	300	2,42	3,5



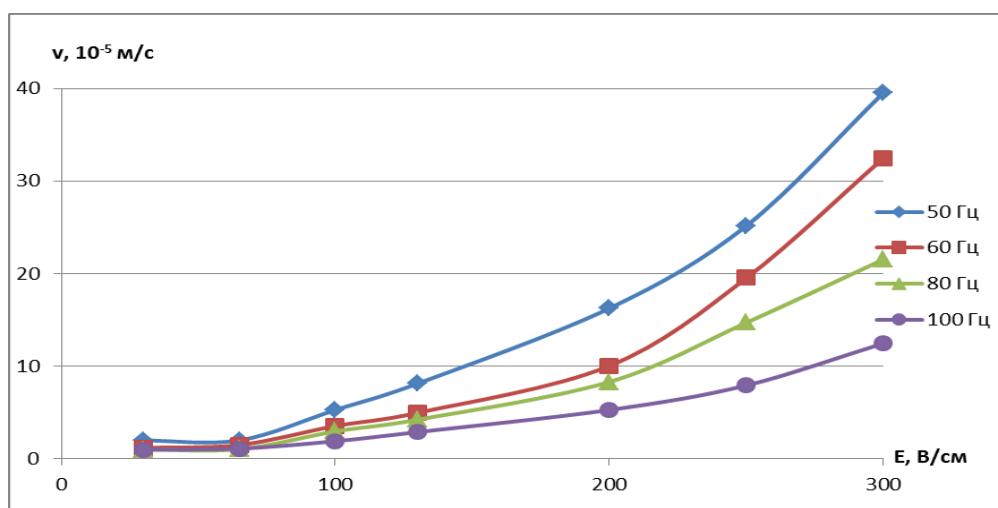
**Рис. 3. Зависимости скорости влагопереноса  $v$  через стенку стебля водного раствора KCl от его концентрации и напряженности постоянного электрического поля в «обратном» направлении – от внешней поверхности эпидерма к внутренней**

Зависимость скорости переноса электролита через стенку стебля от частоты и напряженно-

сти электрического поля представлена в таблице 3 и на рисунке 4.

**Результаты измерения и расчета скорости влагопереноса (вода) через стенку стебля в зависимости от частоты и напряженности электрического поля**

Напряженность электрического поля E, В/см	Скорость влагопереноса v, 10 <sup>-5</sup> м/с			
	f=50 Гц	f=60 Гц	f=80 Гц	f=100 Гц
30	1,99	1,2	1	1
65	2,01	1,51	1,05	1,11
100	5,29	3,56	2,98	1,92
130	8,14	4,98	4,24	2,9
200	16,27	10,04	8,32	5,29
250	25,18	19,54	14,72	7,94
300	39,54	32,49	21,54	12,48



**Рис. 4. Зависимости скорости влагопереноса через стенку стебля от частоты и напряженности электрического поля: 1 – f=50 Гц; 2 – f=60 Гц; 3 – f=80 Гц; 4 – f=100 Гц**

С целью изучения зависимости электрокинетического потенциала  $\xi$  [1] от напряженности электрического поля и направления протекания тока через стенку стебля, а также для проверки справедливости гипотезы о влиянии  $\xi$ -потенциала на величину разности потенциалов между внешней и внутренней поверхностями стенки стебля в соответствии с выражением [1]

$$v = \frac{E\xi\varepsilon}{4\pi\eta},$$

где  $\xi$  – электрокинетический потенциал диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС);

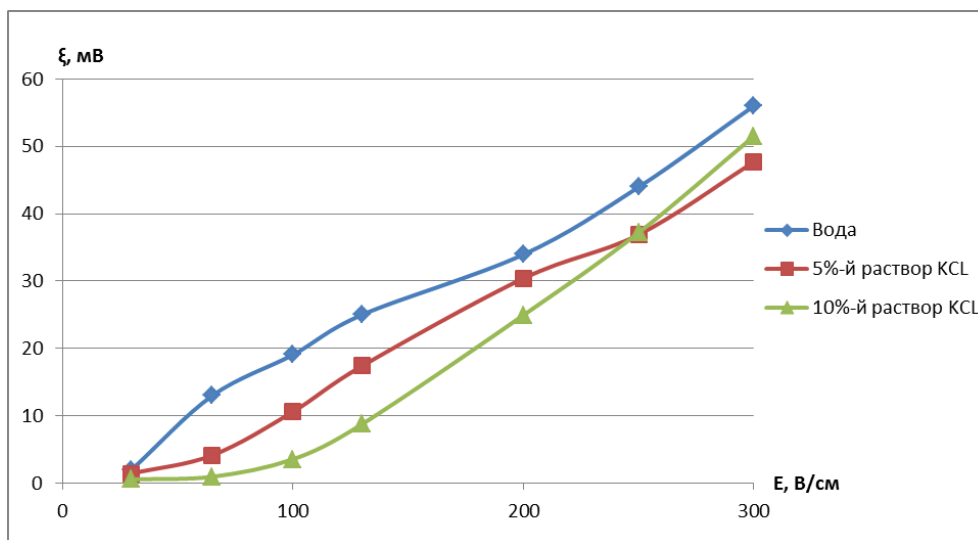
$\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость, для воды  $\varepsilon = 692,8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$E$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;

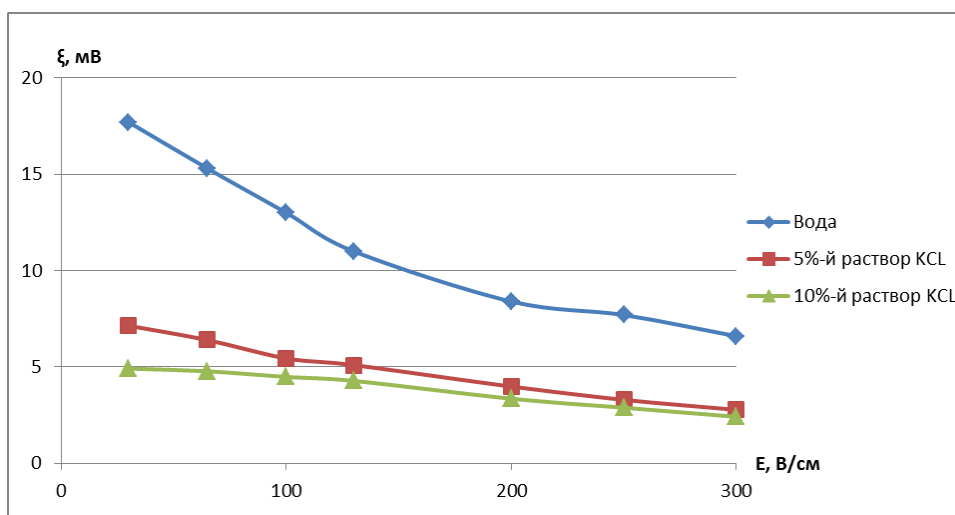
$\eta$  – вязкость воды,  $\eta = 89,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>-1</sup> · кг · с<sup>-1</sup>, был произведен расчет электрокинетического потенциала диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС) в «прямом» и «обратном» направлениях.

Результаты расчета представлены на рисунке 5.

При расчете использованы следующие величины: радиус капилляра электрокинетической ячейки  $r=0,05$  см; абсолютная диэлектрическая проницаемость воды  $\varepsilon_a=692,8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м; вязкость воды при температуре 25°C  $\eta=89,5 \cdot 10^{-6}$  Па · с.



а



б

Рис. 5. Расчетные зависимости  $\xi$  – потенциала от напряженности электрического постоянного поля и направления протекания через стенку стебля: а – в «прямом» направлении; б – в «обратном»

### Заключение

1. Стенка стебля обладает неидеальной односторонней проводимостью по отношению к переносимому через нее под действием внешнего электрического поля водному раствору электролита. Скорость влагопереноса в «прямом» – от внутренней поверхности стенки стебля к внешней – направлении с увеличением частоты электромагнитных колебаний уменьшается.

2. Электрокинетический потенциал  $\xi$ , являющийся составной частью поверхностного потенциала стенки стебля, с увеличением напряженности электрического поля увеличивается в «прямом» направлении и уменьшается в «обратном». В связи с этим увеличение  $\xi_2$  – потен-

циала в «прямом» направлении сопровождается возрастанием потенциала на внутренней поверхности стенки стебля  $\varphi_{Д2} = -\psi_2 - \xi_2$ , где  $\psi_2$  – потенциал плотной части двойного электрического слоя ДЭС с внутренней стороны стенки стебля, а уменьшение  $\xi_1$  – потенциала в «обратном» направлении – увеличением потенциала  $\varphi_{Д1} = \psi_1 - \xi_1$  со стороны внешней поверхности.

Указанный характер изменения поверхностных потенциалов обуславливает увеличение разности потенциалов между внешней и внутренней поверхностями стенки стебля  $\Delta\varphi_M = \varphi_{Д1} - \varphi_{Д2} = \psi_1 - \xi_1 + \psi_2 + \xi_2$  по мере возрастания напряженности внешнего электрического поля независимо от направле-

ния протекания тока, что является причиной существования неидеального вентиляющего эффекта стенки стебля как по току, так и по влагопереносу.

#### 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. 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.

3. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон; перевод с английского. – Москва: Мир, 1979. – 568 с. – Текст: непосредственный.

4. Девис, С. Электрохимический словарь / С. Девис, А. Джеймс; перевод с английского. – Москва: Мир, 1979. – 286 с. – Текст: непосредственный.

5. 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.

6. 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.

7. Багаев, А. А. Электрическая эквивалентная схема замещения стенки стебля раститель-

ных 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.

#### References

1. Bagaev A.A. Matematicheskaja model vlago- i tokoperenosa cherez stenkku steblija 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. Bagaev A.A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniia poliarizatsionnykh kharakteristik stenki steblija kormovykh trav // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 9 (227). – S. 85-90. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-227-9-85-90.

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

4. Devis S., Dzheims A. Elektrokhimicheskii slovar / per. s angl. – Moskva: Mir, 1979. – 286 s.

5. Bagaev A.A. Garmonicheskii analiz ostsillogramm elektricheskogo toka cherez stenkku steblija 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. Bagaev A.A. Matematicheskaja model raspredeleniia kontsentratsii tokoperenosiashchego iona na poverkhnosti stenki steblija rastitelnykh materialov v protsessakh elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 12 (230). – S. 72-76. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-230-12-72-76.

7. Bagaev A.A. Elektricheskaja ekvivalentnaia skhema zameshcheniia stenki steblija rastitelnykh materialov v protsessakh elektroosmoticheskogo obezvozhivaniia // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 1 (231). – S. 83-91. DOI: 10.53083/1996-4277-2024-231-1-83-91.

