

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.359.2:631.15
DOI: 10.53083/1996-4277-2023-229-11-83-88

А.А. Багаев
A.A. Bagaev

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ СТЕНКУ СТЕБЛЯ КОРМОВЫХ ТРАВ

HARMONIC ANALYSIS OF OSCILLOGRAMS OF ELECTRIC CURRENT THROUGH STEM WALL OF FORAGE GRASSES

Ключевые слова: электроосмос, электроплазмолиз, электрический ток через стенку стебля кормовых трав, гармонический анализ, ряд Фурье.

Исследование путей повышения энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания и электроплазмолиза кормовых трав требует обоснования путей увеличения технологической составляющей общего тока при одновременном снижении термической составляющей. Определение указанных путей возможно на основе синтеза и анализа эквивалентной электрической схемой замещения стенки стебля. Одним из этапов переноса тока и влаги через стенку стебля является стадия переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита», для математического описания которой требуется оценка гармонического состава суммарного тока переноса через межфазную границу. Целью является оценка гармонического состава тока через стенку стебля кормовых трав. Используются методы электрических и электрохимических измерений, теоретических основ электротехники, гармонического анализа периодических несинусоидальных колебаний. Представлена схема экспериментальной установки, методики отбора проб и проведения измерений, статистической обработки результатов измерений. В результате разложения экспериментальной осциллограммы в ряд Фурье установлено, что электрический ток через стенку стебля кормовых трав можно рассматривать как сумму постоянной составляющей, первой и второй гармонической составляющими с соответствующими начальными фазовыми углами сдвига. Полученный результат позволяет получить математическую модель стадии переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-водный раствор электролита» и обоснованно учесть эту стадию переноса в электрической эквивалентной схеме замещения стенки стебля. При

этом электрическая эквивалентная схема замещения стенки стебля позволит оценить пути повышения энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания и электроплазмолиза кормовых трав за счет увеличения технологической составляющей общего тока при одновременном снижении его нерационального термического воздействия.

Keywords: *electroosmosis, electropasmolysis, electric current through stem wall of forage grasses, harmonic analysis, Fourier series.*

The study of ways to improve energy efficiency of electroosmotic dehydration and electropasmolysis of forage grasses requires substantiation of ways to increase the technological component of the total current while reducing the thermal component. The determination of these ways is possible on the basis of synthesis and analysis of the equivalent electrical substitution scheme of the stem wall. One of the stages of current and moisture transfer through the stem wall is the stage of ion transfer through the interface "stem wall surface - aqueous electrolyte solution", for mathematical description of which it is required to estimate the harmonic composition of the total transfer current through the interface. The goal is to estimate the harmonic composition of the current through the stem wall of forage grasses. The methods of electrical and electro-chemical measurements, theoretical foundations of electrical engineering technology, and harmonic analysis of periodic non-sinusoidal oscillations are used. The scheme of experimental setup, methods of sampling and measurements, and statistical processing of measurement results are discussed. As a result of decomposition of the experimental oscillogram into Fourier series it is found that the current through the stem wall of a forage grass may be considered as the sum of the constant component, first and second harmonic components with the corresponding initial phase

shift angles. The obtained result allows obtaining a mathematical model of the stage of ion transfer through the interface "surface of the stem wall - aqueous electrolyte solution" and reasonably taking into account this stage of transfer in the electrical equivalent substitution scheme of the stem wall. In this case, the electrical equivalent scheme of

substitution of the stem wall will allow estimating ways to improve energy efficiency of electroosmotic dehydration and electropulsation of forage grasses by increasing the technological component of the total current while reducing its irrational thermal impact.

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

Исследование путей повышения энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания и электроплазмолиза кормовых трав [1, 2] требует обоснования путей увеличения технологической составляющей общего тока при одновременном снижении термической составляющей [3].

Определение указанных путей возможно на основе синтеза и анализа эквивалентной электрической схемой замещения стенки стебля.

Предварительные этапы обоснования схемы замещения изложены в работах [3, 4].

В работе [3] представлена математическая модель токо-, влагопереноса через стенку стебля кормовых трав.

В работе [4] экспериментально исследована поляризационная (вольт-амперная) характеристика стенки стебля.

С использованием результатов исследований [3, 4] выдвинута гипотеза об обладании стенкой стебля неидеальным полупроводниковым эффектом по току и по влаге.

Одним из рассмотренных в [3] этапов переноса тока и влаги через стенку стебля является стадия переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля – водный раствор электролита», для математического описания которой требуется оценка гармонического состава суммарного тока переноса через межфазную границу.

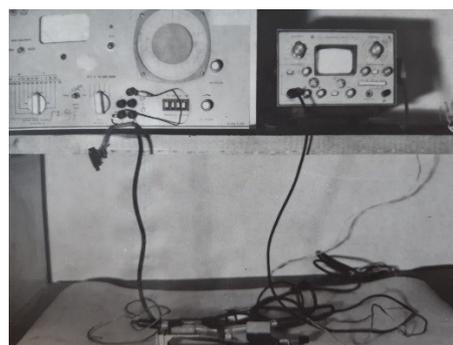
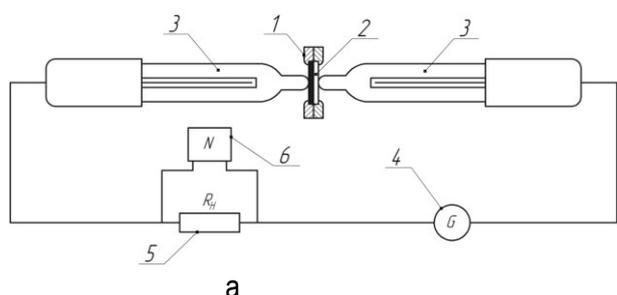
Целью является оценка гармонического состава тока через стенку стебля кормовых трав.

Методы и средства

Методы электрических и электрохимических измерений, теоретических основ электротехники, гармонического анализа периодических не-синусоидальных колебаний.

Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки для осциллографирования электрического тока через стенку стебля и ее общий вид представлены на рисунке 1.



а

б

Рис. 1. Получение экспериментальных осциллограмм электрического тока через стенку стебля кормовых трав при наложении на нее синусоидального напряжения:
а – схема, б – общий вид стенда; 1 – кассета для исследуемого образца стенки стебля, 2 – стенка стебля, 3 – хлорсеребряные электроды ЭВЛ-1МЗ, 4 – генератор синусоидальных колебаний ГЗ-109, 5 – нагрузочное сопротивление, 6 – осциллограф (фото автора)

Методика подготовки образцов. В качестве исследуемой злаковой кормовой культуры использовался Костер безостый (*Bromus inermis*).

Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 4808-87. Сено. Технические условия.

Методика проведения измерений. Стенка стебля 2 помещается между разъемными пластинами кассеты 1 (рис. 1а). Хлорсеребряные электроды 3 вводятся в контакт с поверхностями исследуемого образца. Толщина среза $h=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, площадь контакта $S=3,14 \cdot 10^{-6}$ м².

Амплитудное значение и частота напряжения изменяются с помощью генератора синусоидальных колебаний 4.

Осциллограф 6 регистрирует напряжение на нагрузочном сопротивлении 5 известной величины R_N . Измеренное значение напряжения пропорционально протекающему через стенку стебля току.

Повторность измерений пятикратная, что обеспечивает принятые в технике доверительную вероятность 0,9 и допустимую ошибку ε , выраженную в долях среднеквадратичного отклонения σ , равную $\varepsilon=\pm 1\sigma$.

Методика статистической обработки результатов измерений. По результатам как минимум пятикратных измерений оценивалась дисперсия воспроизводимости, проводилась проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена. Нормальность закона распределения производилась с использованием коэффициента асимметрии и эксцесса. Используя средние значения однофакторного эксперимента отклика, производили аппроксимацию результатов с оценкой коэффициента взаимной корреляции $R^2 \rightarrow 1$ [5].

На рисунке 2 представлен пример осциллограммы электрического тока через стенку стебля при амплитуде приложенного напряжения 3 В на частоте 50 Гц.

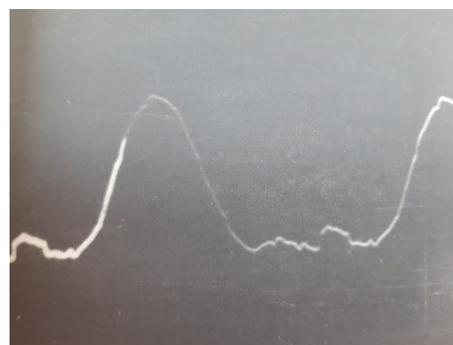


Рис. 2. Осциллограмма тока, полученная с экрана осциллографа при амплитуде напряжения 3 В и частоте 50 Гц (фото автора)

Осциллограмма на рисунке 2 является периодической несинусоидальной функцией, гармонический анализ которой возможен с использованием основных положений теоретических основ электротехники [6].

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показано применение графического метода определения электрического тока через стенку стебля с использованием экспериментальной вольт-амперной характеристики (ВАХ), полученной в работе [4], на частоте приложенного напряжения 50 Гц.

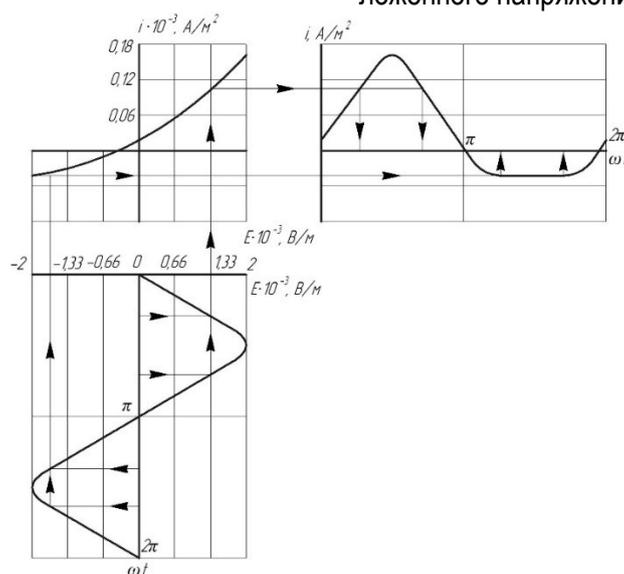


Рис. 3. Графическое определение электрического тока через стенку стебля с использованием экспериментальной ВАХ на частоте приложенного напряжения 50 Гц

Результатом умножения плотности тока поляризационной (вольт-амперной) характери-

сти (рис. 3) на площадь пятна контакта хлорсеребряных электродов (рис. 1а) $S=3,14 \cdot 10^{-6}$ м²

является осциллограмма тока через стенку стебля в абсолютных величинах (рис. 4).

По отношению к теоретической осциллограмме тока через стенку стебля при величине приложенного напряжения 3 В и его частоте 50 Гц применен метод разложения периодической несинусоидальной функции в ряд Фурье [6, 7], в соответствии с которым период функции тока $i(x)=i(\omega t)$, составляющий 2π , разбивается на n равных интервалов $\Delta x=\Delta\omega t$ (в данном случае $n=24$):

$$\Delta x = 2\pi/n = 2\pi/24. \quad (1)$$

Значения ординат функции тока $i(x)$ при разбивке на $n=24$ интервала приведены в таблице, в которой p – текущий индекс интервала принимает значения от 1 до 24; $i_p(x)$ – значение функции $i(x)$ при $x=(p-0,5) \cdot \Delta x$, т.е. в середине p -го интервала.

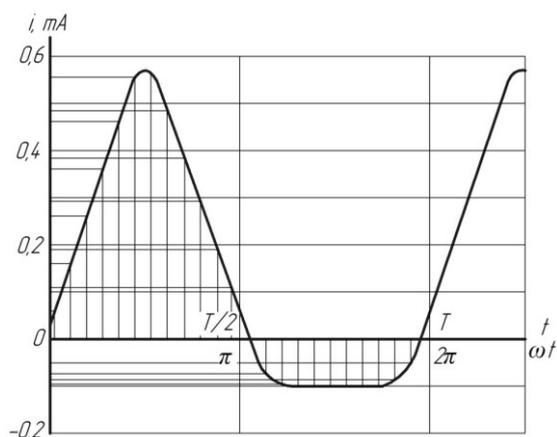


Рис. 4. Теоретическая осциллограмма тока через стенку стебля при величине приложенного напряжения 3 В и его частоте 50 Гц

С использованием данных таблицы определены постоянная составляющая, амплитуды синусных и косинусных составляющих, амплитуды первой, второй и третьей гармонических составляющих тока.

Постоянная составляющая тока, мА:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n i_p(x) \approx 0,13. \quad (2)$$

Амплитуда синусной составляющей первой гармоники тока, мА:

$$A_1' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \sin_p x \approx 0,34. \quad (3)$$

Амплитуда косинусной составляющей первой гармоники тока, мА:

$$A_1'' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \cos_p x \approx 0,000367. \quad (4)$$

Таблица

Значения ординат функции тока $i(x)$ при разбивке периода тока на $n=24$ интервала

p	$i_p(x)$, мА	x , град.
1	0,053	7,5
2	0,188	22,5
3	0,330	37,5
4	0,457	52,5
5	0,540	67,5
6	0,600	82,5
7	0,580	97,5
8	0,500	112,5
9	0,410	127,5
10	0,300	142,5
11	0,250	157,5
12	0,053	172,5
13	-0,036	187,5
14	-0,099	202,5
15	-0,107	217,5
16	-0,109	232,5
17	-0,104	247,5
18	-0,107	262,5
19	-0,102	277,5
20	-0,107	292,5
21	-0,107	307,5
22	-0,100	322,5
23	-0,090	337,5
24	-0,050	352,7

Амплитуда синусной составляющей второй гармоники тока, мА:

$$A_2' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \sin_p 2x \approx 0,0786. \quad (5)$$

Амплитуда косинусной составляющей второй гармоники тока, мА:

$$A_2'' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \cos_p 2x \approx 0,0733. \quad (6)$$

Амплитуда синусной составляющей третьей гармоники тока, мА:

$$A_3' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \sin_p 3x \approx 0,000412. \quad (7)$$

Амплитуда косинусной составляющей третьей гармоники тока, мА:

$$A_3'' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} i_p(x) \cos_p 3x \approx -0,00014. \quad (8)$$

Амплитуды первой, второй и третьей гармоник тока соответственно, мА:

$$A_1 = \sqrt{(A_1')^2 + (A_1'')^2} = 0,34; \quad (9)$$

$$A_2 = \sqrt{(A_2')^2 + (A_2'')^2} = 0,1; \quad (10)$$

$$A_3 = \sqrt{(A_3')^2 + (A_3'')^2} = 0,00045. \quad (11)$$

Тангенсы начальных фазовых углов φ и начальные фазовые углы φ первой, второй и третьей гармонических составляющих тока через стенку стебля:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{A_1''}{A_1} = 0,0018; \quad \varphi_1 = 0,0618; \quad (12)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{A_2''}{A_2} = 0,93; \quad \varphi_2 = 43; \quad (13)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_3 = \frac{A_3''}{A_3} = -0,339; \quad \varphi_3 = -18,76. \quad (14)$$

Таким образом, если пренебречь третьей гармонической составляющей в силу малости ее амплитудного значения, то периодический несинусоидальный ток через стенку стебля кормовых трав при выполнении вышеперечисленных условий описывается следующим гармоническим рядом Фурье, мА:

$$i(x) \approx 0,13 + 0,34\sin(\omega t + 0,0618^\circ) + 0,1\sin(2\omega t + 87,02^\circ) + \dots \quad (15)$$

На рисунке 5 представлена графическая интерпретация гармонического состава тока через стенку стебля кормовых трав при напряжении 3 В и его частоте 50 Гц.

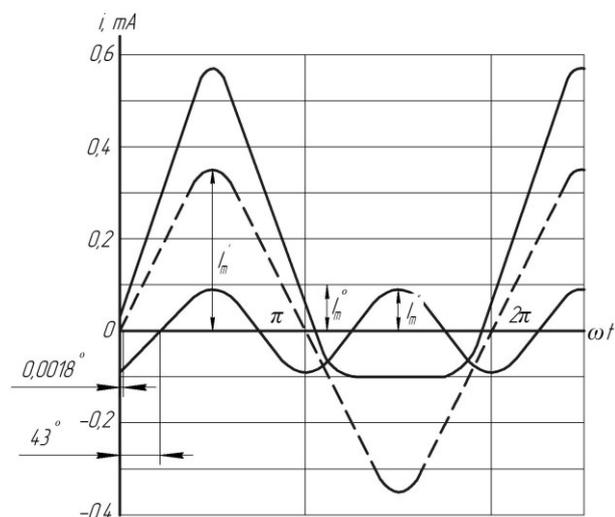


Рис. 5. Гармонический состав тока через стенку стебля кормовых трав при напряжении 3 В и его частоте 50 Гц

Заключение

Электрический ток через стенку стебля кормовых трав можно рассматривать как сумму постоянной составляющей, первой и второй гармонических составляющих с соответствующими начальными фазовыми углами сдвига. Полученный результат позволяет получить математическую модель стадии переноса иона через границу раздела фаз «поверхность стенки стебля-

водный раствор электролита» и обоснованно учесть эту стадию переноса в электрической эквивалентной схеме замещения стенки стебля. При этом электрическая эквивалентная схема замещения стенки стебля позволит оценить пути повышения энергоэффективности процессов электроосмотического обезвоживания и электроплазмолиза кормовых трав за счет увеличения технологической составляющей общего тока при одновременном снижении его нерационального термического воздействия.

Библиографический список

1. Багаев, А. А. Электротехнология: учебное пособие / А. А. Багаев, Л. В. Куликова, А. И. Багаев. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с. – Текст: непосредственный.
2. Куликова, Л. В. Электротехнология: учебное пособие / Л. В. Куликова, А. А. Багаев. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 372 с. – Текст: непосредственный.
3. 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.
4. 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.
5. Семенов, Б. А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебное пособие / Б. А. Семенов. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 400 с. – Текст: непосредственный.
6. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / А. А. Багаев, Л. В. Куликова, Э. В. Кузьмин [и др.]: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во ФГБОУ ВПО АлтГТУ, 2000. – 772 с. – Текст: непосредственный.
7. Романовский, П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа / П. И. Романовский. – Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1959. – 304 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Bagaev A.A. Elektrotehnologija: uchebnoe posobie / A.A. Bagaev, L.V. Kulikova, A.I. Bagaev. – Barnaul: Izd-vo Altaiskogo GAU, 2006. – 320 s.
2. Kulikova L.V. Elektrotehnologija: uchebnoe posobie / L.V. Kulikova, A.A. Bagaev. – Moskva, Berlin: Direkt-Media, 2021. – 372 s.
3. Bagaev, A. A. Matematicheskaia model vlogo- i tokoperenosa cherez stenu stebliia 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.
4. 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.
5. Semenov B.A. Inzhenernyi eksperiment v promyshlennoi teplotekhnike, teploenergetike i teplotekhnologiiakh: uchebnoe posobie. – Sankt-Peterburg: «Lan», 2013. – 400 s.
6. Bagaev A.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: uchebnoe posobie / A.A. Bagaev, L.V. Kulikova, E.V. Kuzmin, V.N. Larionov, V.D. Mikheev, O.K. Nikolskii: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo FGBOU VPO AltGTU, 2000. – 772 s.
7. Romanovskii P.I. Riady Fure. Teoriia polia. Analiticheskie i spetsialnye funktsii. Preobrazovanie Laplasa. – Moskva: Gos.izd-vo fiz.-mat.lit-ry, 1959. – 304 s.



УДК 631.362

А.А. Бауер, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, Р.В. Родин

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-229-11-88-93 А.А. Bauer, N.I. Strikunov, S.V. Lekanov, R.V. Rodin

РАЗРАБОТКА ПНЕВМОСЕПАРАТОРА С КОЛЬЦЕВЫМ МНОГОЯРУСНЫМ АСПИРАЦИОННЫМ КАНАЛОМ

DEVELOPMENT OF PNEUMATIC SEPARATOR WITH A RING MULTI-TIERED ASPIRATION CHANNEL

Ключевые слова: зерновая смесь, легкие примеси, трудноотделимые примеси, пневмосепаратор, кольцевой канал, воздушный поток, эффективность сепарирования, скорость витания, аэродинамические свойства.

Воздушное сепарирование широко применяется в современных технологиях послеуборочной обработки зерна. Пневмосепарирующие каналы различного типа применяются в пневмосепараторах как отдельная воздушная машина, так и в составе воздушно-решётных зерноочистительных машин. В последнее время всё большее применение находят кольцевые пневмоканылы. Они имеют высокую производительность, а скорости воздушного потока в зоне сепарации могут быть выше, чем в прямоугольных аспирационных каналах. В современных зерноочистительных машинах для разделения зернового материала, как показывает практика, широко используются различия компонентов зернового вороха в основном по парусности и размерам. Многолетними исследованиями установлено, что наиболее целесообразно при предварительной очистке осуществлять разделение зернового материала по парусности, так как выделение легких компонентов на первой стадии очистки облегчает последующую работу

решётных станков. При подготовке семян, на стадии окончательной очистки, воздушное сепарирование применяют для сортирования. По результатам проведенного анализа аспирационных систем зерноочистительных машин установлено, что наиболее перспективным направлением является разработка кольцевых пневмосепарирующих каналов. Интенсифицировать процесс сепарирования в таких каналах можно за счёт встречного движения воздушного потока и обрабатываемого материала. При тонкослойном вводе зернового материала в зону сепарации с последующим многократным воздействием на него воздушного потока можно повысить эффективность сепарирования. Предложен воздушный сепаратор с многоярусным кольцевым аспирационным каналом, проведён расчет основных конструктивно-режимных параметров.

Keywords: grain mixture, light impurities, hard-separable impurities, pneumatic separator, annular channel, air flow, separation efficiency, terminal velocity, aerodynamic properties.

Air separation is widely used in modern technologies of post-harvest grain handling. Pneumatic separating channels of various types are used in pneumatic separators,