

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 4 (52). С. 51–60
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2024; 4(52): 51–60

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 631.362.36
Код ВАК 4.3.1

EDN: NZRMAS

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР ТОКАМИ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Светлана Владимировна Белозерова^{1✉}, Петр Алексеевич Савиных², Алексей Юрьевич Исупов³

¹ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина, Вологда, Россия

^{2,3} Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, Киров, Россия

¹ 79114412800@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8752-7929>

² peter.savinyh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>

³ isupoff.aleks@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3399-5089>

Аннотация. Целью исследования является определение режимов работы и параметров рабочих органов установки для обработки зерна злаковых культур токами сверхвысокой частоты (далее СВЧ), способствующих получению максимальной пропускной способности и нахождения в зоне облучения в течение 15 с. Для достижения поставленной цели была реализована методика планирования многофакторного эксперимента Бокса – Бенкина. Дано описание используемых параметров и методов их варьирования в ходе эксперимента, а также кратко представлены сведения о работе исследуемых узлов и элементов конструкции исследуемого устройства, принципиально состоящего из двух частей: механической – вибротранспортера и электрической – излучателя сверхвысокой частоты. Проанализировано влияние подачи зернового материала, эксцентриситета и частоты вращения эксцентриков, а также угла наклона желоба вибротранспортера на пропускную способность и среднее время облучения зерна на контрольном участке. Установлено, что при нахождении зернового материала в зоне облучения токами сверхвысокой частоты в течение требуемых 15 с максимальная пропускная способность установки составит 55,95 кг/ч. Необходимыми условиями для их достижения являются: подача – 61,5 кг/ч (зазор выгрузного отверстия – 16,24 мм); эксцентриситет эксцентриков – 3,92 мм (угол между грузами эксцентриками – 150°); наклон ложи / дна транспортера – 7° и частота вращения эксцентриков – 2940±30 мин⁻¹ (частота тока вибратора – 50 Гц). В экспериментальных исследованиях получены математические модели пропускной способности и среднего времени облучения на контрольном участке установки для обработки зерна токами сверхвысокой частоты в зависимости следующих входных параметров: подача зерна, эксцентриситет и частота вращения эксцентриков, а также угол наклона желоба вибротранспортера.

Ключевые слова: математические модели, статистическая обработка, анализ зависимостей, критерии оптимизации, влияние факторов, СВЧ-обработка.

Благодарности: работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина» и ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Белозерова С.В., Савиных П.А., Исупов А.Ю. Оптимизация работы механической части установки для обработки зерна злаковых культур токами сверхвысокой частоты // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 4(52). С. 51–60. EDN: NZRMAS.

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE MECHANICAL PART OF THE PLANT FOR CEREAL GRAIN PROCESSING WITH ULTRA-HIGH FREQUENCY CURRENTS

Svetlana V. Belozerova^{1✉}, Petr A. Savinykh², Aleksey U. Isupov³

¹ Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, Vologda, Russia

^{2,3} Federal Agricultural scientific Research Centr of the North-East named N.V. Rudnitskiy, Kirov, Russia

¹ 79114412800@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8752-7929>

² peter.savinyh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>

³ isupoff.aleks@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3399-5089>

© Белозерова С.В., Савиных П.А., Исупов А.Ю., 2024

Abstract. The purpose of the study is to determine the operating modes and parameters of the operating elements of the plant for cereal grain processing with ultrahigh frequency currents (hereinafter referred to as UHF), which contribute to obtaining maximum output capacity when staying in the irradiation zone for 15 seconds. To achieve the target goal, the method of planning the Box-Benkin multifactorial experimental design was implemented. The article describes the parameters used and methods of their variation during the experiment, as well as gives brief information about the operation of the components and the structural elements of the device under study, which basically consists of two parts, such as a mechanical one, a vibration transporter, and an electric one, an ultrahigh frequency emitter. The study has given an analysis of the influence of grain feed, eccentricity and rotation frequency of the eccentrics, as well as the tilt angle of the vibration conveyor chute on the output capacity and average irradiation time of grain in the control area. It was found that when the grain material is in the irradiation zone with ultrahigh frequency currents during the required 15 seconds, the maximum output capacity of the plant will be 55.95 kg/h. The necessary conditions for their achievement are: feed – 61.5 kg/h (clearance of the discharge opening – 16.24 mm); eccentricity of the eccentrics – 3.92 mm (angle between the eccentric loads – 150°); inclination of the bed/bottom of the conveyor – 7° and rotation frequency of the eccentrics – $2,940 \pm 30 \text{ min}^{-1}$ (frequency of the vibrator current – 50 Hz). In the experimental studies, the mathematical models of the output capacity and average irradiation time at the control site of the grain processing plant with ultrahigh frequency currents were obtained depending on the following input parameters: grain feed, eccentricity and rotation frequency of the eccentrics, as well as the tilt angle of the vibration conveyor chute.

Keywords: mathematical models, statistical processing, dependency analysis, optimization criteria, influence of factors, UHF processing.

Acknowledgments: the work was funded from the budget of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin' and the Federal State Funded Research Institution 'Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky'. No additional grants have been received to conduct or direct this particular study.

For citation: Belozeroва S.V., Savinykh P.A., Isupov A.U. Optimization of the mechanical part of the plant for cereal grain processing with ultra-high frequency currents. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2024; 4(52): 51–60. EDN: NZRMAS. (In Russ).

Введение. Одним из факторов повышения эффективности молочного животноводства и устойчивого их развития является собственное кормопроизводство [1; 2]. Рост производства продукции животноводства напрямую связан с увеличением производства зерновых культур. Однако эффективность растениеводства как отрасли сельского хозяйства во многом зависит от применения химических препаратов, например, при защите растений от болезней и вредителей при предпосевной обработке [3]. Альтернативным методом, способствующим росту урожайности зерновых культур за счет улучшения всхожести семян и устойчивости к вредителям и болезням, является использование предпосевной обработки семенного материала токами СВЧ.

Выявлено, что под влиянием СВЧ-обработки и ее различных режимов, как по мощности воздействия, так и по экспозиции, происходит изменение энергии прорастания семян и их всхожести. Так, семена с исходной всхожестью 90 % после обработки повышали всхожесть на 2...4 %, а при исходной всхожести 62 % – на 5...7 %. Изучение влияния электромагнитного поля на семена перед посевом показало, что такого рода воздействие является стрессовым фактором: изменяется скорость некоторых химических реакций, при этом семена начинают активно функционировать, больше поглощая влаги на начальных фазах прорастания, а крахмал в клетках быстрее переходит в сахара [4–6].

В исследованиях С. В. Вендина совместно с другими учеными описаны результаты изучения влияния химических, физических и сверхвысокочастотных способов обеззараживания зерна перед проращиванием. Установлено, что СВЧ-обработка, наряду с обеззараживанием, повышает энергию роста и дружность проращивания [7].

Микробное обсеменение злаковых зерновых культур может происходить на любой стадии вегетационного периода, а также при послеуборочной обработке зерна. Исследования О. М. Соболевой

показали, что при равных мощности и частоте СВЧ-обработки (700 Вт) продолжительность облучения в течение 5 с приводит к стимулированию роста микроорганизмов на поверхности зерен, облучение в течение 15 с снижает количество микроорганизмов на 86 % и более в зависимости от вида зерновых, а обработка в течение 45 с приводит к полной стерилизации зерен.

Д. А. Будников отмечает, что обработка зерна в псевдооживленном и разряженном состоянии, в том числе с применением микроволновых полей, отличается высокой эффективностью, поэтому данные о значениях коэффициента диэлектрических потерь имеют важное значение при совершенствовании существующего и построении нового оборудования. Автор представляет исследования энергоэффективности СВЧ-сушки сои в псевдооживленном состоянии в зависимости от толщины обрабатываемого слоя, скорости агента сушки, его температуры и удельной мощности воздействующего электромагнитного поля [8–10]. Также описывает результаты определения коэффициента диэлектрических потерь для пшеницы влажностью 11–30 % и плотностью слоя от 220 до 660 кг/м³, которые показали, что общая динамика изменения фактора соответствует друг другу для разной плотности обработки, но значительно отличается по уровню. Наименьшие колебания коэффициента диэлектрических потерь наблюдаются в пределах 0,07–0,15 при обработке пшеницы в псевдооживленном слое. Зависимость диэлектрических свойств может быть описана полиномиальной моделью.

СВЧ-обработка семян показывает не только высокую эффективность в повышении посевных качеств семян, но и демонстрирует оздоровление посевного материала от комплекса фитопатогенных организмов различной этиологии, при этом эффективно уничтожая патогенную микрофлору, локализованную как на поверхности, так и внутри семян.

Технология обработки зерна токами СВЧ может проводиться с целью предпосевной обработки, обеззараживания, сушки, измельчения зерна на кормовые цели [11–13]. Данная технология относится к безопасным способам ведения сельскохозяйственного производства ввиду отсутствия негативного воздействия на окружающую среду [14–16]. Развитие и внедрение инновационных отечественных технологий в сельское хозяйство способствует успешному функционированию отечественных предприятий, в том числе благодаря внедрению технологии СВЧ обработки зерна [17–19].

Материалы и методы. На основании проведенного анализа научно-технической литературы, а при данных теоретических исследованиях [19; 20] предложена конструктивно-технологическая схема установки для обработки зерна злаковых культур токами СВЧ (рисунок 1).

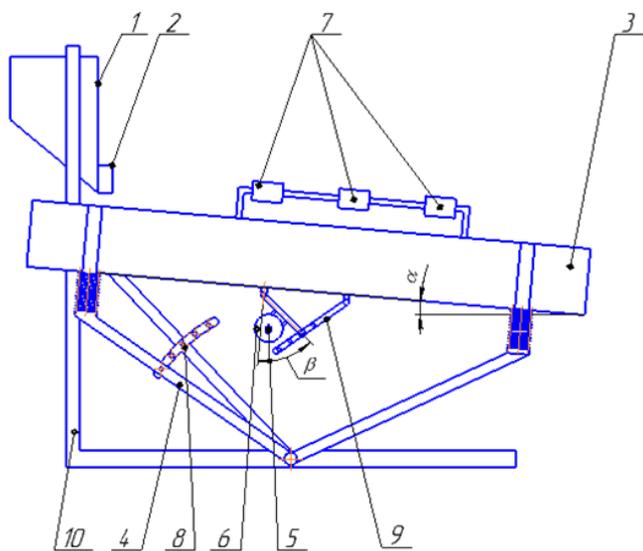
Установка работает следующим образом: зерно из бункера питателя, состоящего непосредственно из бункера (1) и дозирующего устройства (2), поступает в желоб вибрационного транспортера (3), установленный на пружинной подвеске поворотной рамы (10), где под воздействием движущей силы, формируемой колебательными движениями эксцентриков (5) с массой m и эксцентриситетом e , вращающимися с частотой n , расположенными на концах вала электродвигателя (6), и изменяемым углом наклона желоба транспортера α движется по транспортеру. Зерно, движущееся по желобу транспортера (3), являющемуся одновременно камерой СВЧ, подвергается воздействию электромагнитного поля (ЭМП) сверхвысокой частоты (СВЧ), создаваемого магнетронами (7).

Скорость движения зерна по транспортеру,

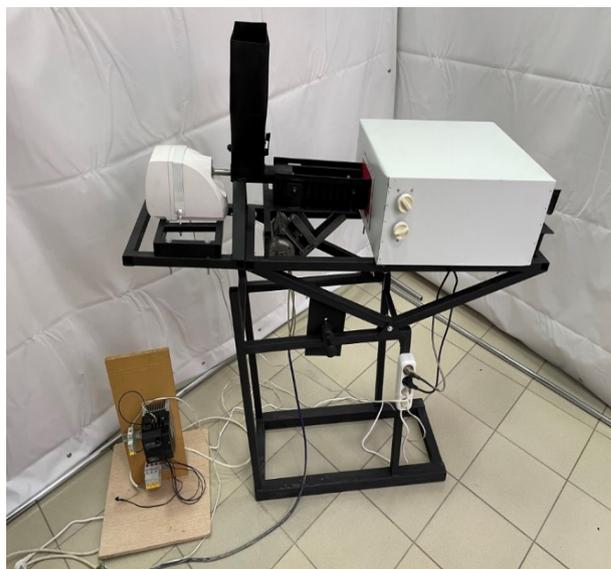
а соответственно, и время обработки СВЧ регулируются путем изменения угла наклона α желоба транспортера за счет механизма изменения угла наклона (8), частотой вращения n эксцентриков (5) и изменения угла положения двигателя (6) относительно нормали к днищу транспортера, именуемом углом направления колебаний β , путем изменения угла положения двигателя (6) относительно лотка транспортера механизмом (9), остов (10) крепится неподвижно, обеспечивая при первоначальной установке горизонтальное положение днища желоба вибротранспортера.

По результатам ранее проведенных однофакторных исследований [20; 21], направленных на выявление параметров, оказывающих наиболее действенное влияние на пропускную способность установки и качество ее обработки зерна токами СВЧ, нами были определены следующие параметры: подача зернового материала, эксцентриситет грузов эксцентриков, частота вращения грузов эксцентриков и угол наклона желоба вибротранспортера.

Целью исследования являлось установление режимов работы установки для обработки зерна злаковых культур токами СВЧ, обеспечивающей максимальную пропускную способность при неизменном высоком качестве обработки зернового материала в течение 15 с [22]. Тем самым необходимо решить компромиссную задачу по поиску оптимума. В связи с этим применена методика планирования и реализации многофакторного эксперимента и, в частности, реализована матрица плана Бокса – Бенкина для четырех факторов. Наименование факторов и их условное обозначение, а также уровни варьирования представлены в таблице 1.



а



б

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема (а) и общий вид (б) установки для СВЧ-обработки зерна злаковых культур

Таблица 1 – Наименование и уровни варьирования факторов

Уровень варьирования фактором	Зазор выгрузного окна, мм	Угол между грузами-эксцентриками, град.	Угол наклона ложа / дна транспортера, град.	Частота тока вибратора транспортера, Гц
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	18	150	7	70
0	12	120	11	60
-1	6	90	15	50

В ходе проведения эксперимента установление уровня варьирования факторами осуществлялось следующим образом:

- зазор выгрузного окна бункера-питателя (x_1) изменяли открытием / закрытием заслонки выгрузного бункера на необходимую величину, при этом обеспечивалась подача зернового материала от 20,6 до 243,7 кг/ч;

- угол между грузами-эксцентриками (x_2) регулировали изменением угла между противоположно расположенными на концах вала вибратора парами грузов-эксцентриков, обеспечивая тем самым эксцентриситет 11,20 мм (90°); 7,80 мм (120°) и 3,92 мм (150°) при массе эксцентрика 79 г;

- угол наклона ложи / дна транспортера (x_3) изменяли поворотом корпуса (дна транспортера) относительно горизонта по направлению движения зернового материала в пределах $7...15^\circ$;

- частоту тока вибратора (x_4), изменяющую частоту вращения вала вибратора регулировали частотным регулятором. При этом частота вращения вала электродвигателя с эксцентриками (вибратора) в зависимости от частоты питающего его тока составляла: 2940 ± 30 мин⁻¹ (погрешность ± 1 %) при 50 Гц; 3500 ± 65 мин⁻¹ (погрешность $\pm 1,9$ %) при 60 Гц; 4050 ± 100 мин⁻¹ (погрешность $\pm 2,5$ %) при 70 Гц.

В соответствии с поставленной целью исследований были приняты следующие критерии оптимизации с желаемым результатом их достижения: получение максимальной пропускной способности (производительности) y_1 при обеспечении среднего времени облучения зерновок y_2 в течении 15 с. Так, под средним временем облучения зерновок y_2 понимается среднеарифметическое время прохождения контрольного участка (525 мм) маркерными зерновками

(окрашены в контрастный цвет) в количестве 5 шт. Фиксация результатов эксперимента осуществлялась не менее чем в 3-кратных повторностях в каждом опыте при помощи секундомера и анализа видеофайлов движения зерна по желобу транспортера. Масса навески зерна в бункере-питателе каждый раз составляла 4 кг. В качестве материала использовался ячмень с влажностью 12,4 %.

Результаты исследований и их обсуждение. Обработка экспериментальных данных с последующим исключением малозначимых на конечный результат критериев оптимизации y_1 и y_2 коэффициентов при факторах и взаимодействии факторов позволила получить математические модели (1) и (2):

$$y_1 = 105,86 + 28,18x_1 - 40,11x_2 - 40,48x_3 + 14,56x_4 - 50,19x_1^2 + 24,42x_2x_3 - 26,0x_2x_4; \quad (1)$$

$$y_2 = 4,54 + 2,59x_1 + 1,30x_2 + 2,58x_3 - 1,56x_4 + 1,93x_1x_2 - 1,83x_3x_4. \quad (2)$$

Основные результаты статистической оценки скорректированных моделей (1) и (2) приведены в таблице 2, из данных которой следует, что математические модели (1) и (2) адекватны и имеют достаточно хорошую (R-squared более 80 %) функциональную зависимость между варьируемыми факторами зазора выгрузного окна x_1 , углов между грузами эксцентриками x_2 и наклона ложа / дна транспортера x_3 , а также частоты тока вибратора транспортера x_4 .

Оценку непосредственного воздействия факторов осуществим с помощью графиков непосредственного влияния факторов (рисунок 2).

Таблица 2 – Результаты статистической оценки математических моделей

Модель	Model d.f.	Error d.f.	P-value	Std. error	R-squared	Adj. R-squared
y_1	7	19	0	23,01	87,88	83,41
y_2	6	20	0	1,62	81,89	76,46

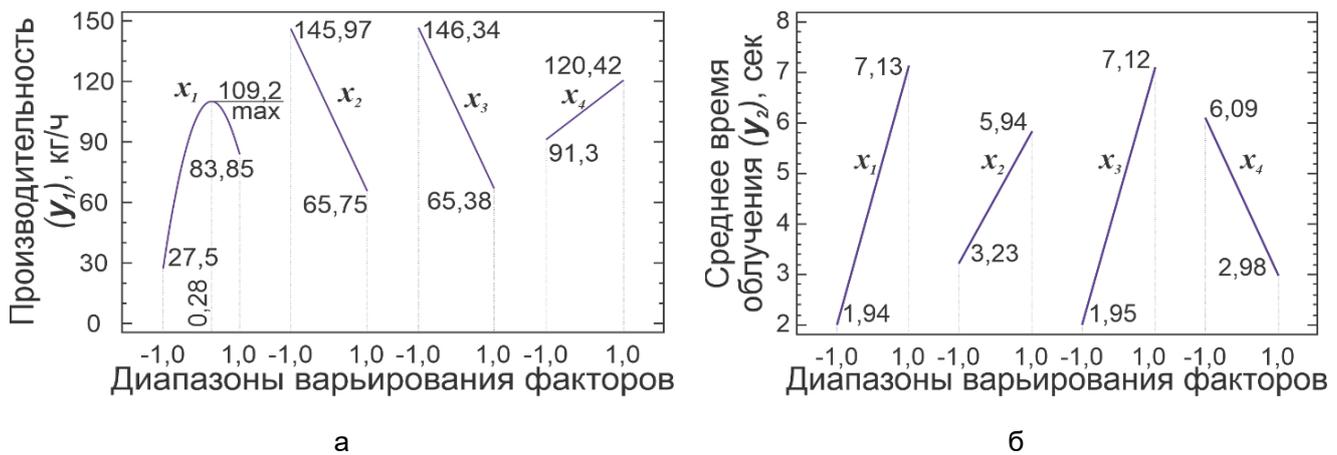


Рисунок 2 – Влияние на пропускную способность y_1 (а) и среднее время облучения материала y_2 (б): зазора выгрузного отверстия x_1 ; угла между грузами эксцентриками x_2 ; угла наклона ложа /дна транспортера x_3 ; частоты тока вибратора транспортера x_4

Анализ представленных на рисунке 2 зависимостей влияния факторов x_1 , x_2 , x_3 и x_4 на критерии оптимизации y_1 и y_2 свидетельствует о том, что:

1) увеличение зазора выгрузного окна x_1 от 6 до 18 мм (от -1,0 до 1,0) приводит к нелинейному (параболическому) росту пропускной способности установки y_1 . Причем максимальная производительность y_1 в 109,2 кг/ч достигается при величине зазора выгрузного окна бункера-питателя 13,68 мм ($x_1 = 0,28$). В то же время среднее время облучения зерна y_2 прямо пропорционально связано с зазором выгрузного окна x_1 , где изменение зазора выгрузного отверстия x_1 от 6 до 18 мм (с -1,0 до 1,0) приводит к росту времени облучения y_2 с 1,94 до 7,13 с. Описываемый эффект от увеличения зазора выгрузного окна x_1 объясняется ростом подачи зерна, т. е. увеличением массы перемещаемого материала. Однако дальнейшее увеличение зазора выгрузного окна более 13,68 мм ($x_1 = 0,28$) приводит к появлению так называемого «завала» желоба транспортёра, т. е. к падению общей скорости материала в результате усиления сил, препятствующих этому движению (внешнее и внутреннее трения материала, изменение кинематических режимов работы транспортера – уменьшение амплитуды и т. п.), и, как следствие, к увеличению времени движения зернового материала на контрольном участке;

2) изменение угла между грузами эксцентриками x_2 в диапазоне от 90 до 150° (от -1,0 до 1,0) приводит к обратно пропорциональному снижению производительности y_1 с 145,97 до 65,75 кг/ч, а также прямо пропорциональному росту среднего времени облучения y_2 с 3,23 до 5,94 с соответственно. Подобный отклик на изменение угла между грузами эксцентриками x_2 связан с изменением средней скорости движения зернового материала в результате уменьшения эксцентриситета во вращающихся эксцентриках на концах вала и, как след-

ствие, кратного падения величины инерциальных сил, под действием которых зерно перемещается по желобу;

3) с увеличением наклона транспортера x_3 с 7° до 15° (с 1,0 до -1,0) наблюдаются вполне ожидаемое снижение времени движения зернового материала y_2 с 7,12 до 1,95 с и прирост пропускной способности y_1 с 65,38 до 146,34 кг/ч в результате увеличения доли силы тяжести разгоняющей зерновой материал и задающей направление движения вдоль желоба /дна вибрационного транспортера. Причем зависимости угла наклона транспортера x_3 для критериев оптимизации y_2 и y_1 пропорциональны.

4) увеличение частоты тока вибратора x_4 с 50 до 70 Гц (с -1,0 до 1,0) приводит к пропорциональному увеличению пропускной способности установки y_1 на 29,12 кг/ч и достигает 120,42 кг/ч. При этом среднее время облучения y_2 пропорционально снижается с 6,09 до 2,98 с. Причиной является рост центробежной силы инерции в вибраторе / эксцентрике в 1,88 раза вызванное увеличением частоты вращения вала с эксцентриками.

Для наглядного представления воздействия парных взаимодействий факторов на критерии оптимизации y_1 и y_2 воспользуемся графиками двумерных сечений (рисунок 3).

Для математической модели (1) статистически значимыми являются парные взаимодействия факторов $x_2 x_3$ и $x_2 x_4$. Поскольку целевой задачей для критерия оптимизации является получение максимальной производительности, то с учетом уже имеющихся данных о непосредственном влиянии факторов x_1 , x_2 , x_3 и x_4 рассмотрим комбинации, обеспечивающие ее достижение. Так, в случае парного взаимодействия факторов $x_2 x_3$ (рисунок 3а) частоту тока вибратора x_4 примем в 70 Гц (1,0), а для парного взаимодействия факторов $x_2 x_4$ (рисунок 3б) угол наклона ложа / дна

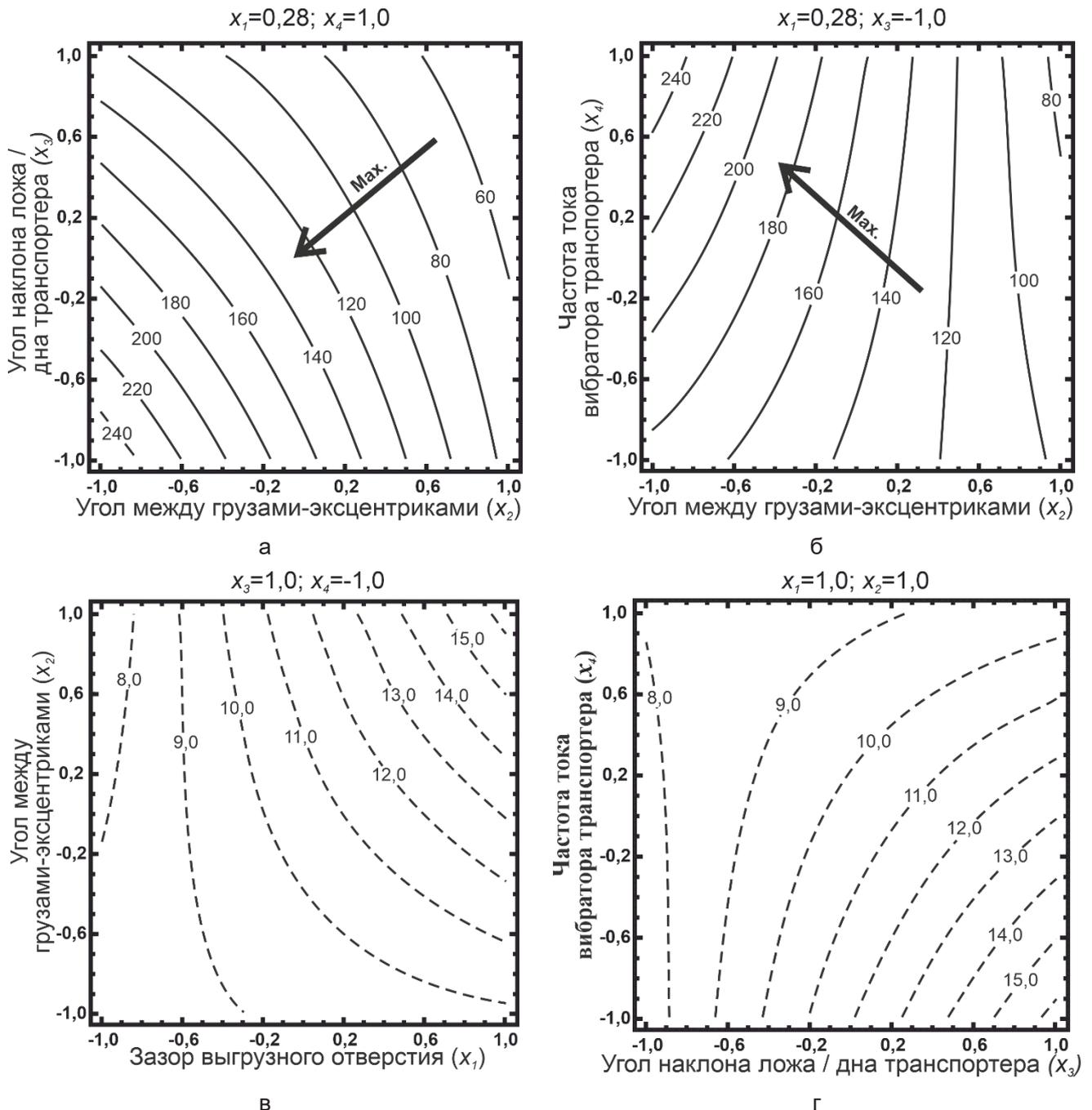


Рисунок 3 – Графики двумерных сечений: производительности (а, б); среднего времени облучения y_2 (в, г)

транспортера x_3 примем в 15° (-1,0). Зазор выгрузного отверстия x_1 в обоих случаях выставим в 13,68 мм (0,28). В результате этого наибольший прирост производительности y_1 (рисунок 2а) оказывает одновременное уменьшение угла между грузами-эксцентриками x_2 до 90° (-1,0) и увеличение угла наклона транспортера x_3 до 15° (-1,0). А в случае взаимодействия факторов x_2 x_4 (рисунок 1б) стремление угла между грузами-эксцентриками x_2 к 90° (-1,0) и роста частоты тока вибратора x_4 до 70 Гц (1,0), так же, как и в первом случае взаимодействия x_2 x_3 , производительность увеличивается с минимально возможных

42,20 кг/ч при ($x_2 = -1,0; x_3 = -1,0$) до максимально возможных 255,38 кг/ч при ($x_2 = 1,0; x_3 = 1,0$), а во втором при x_2 x_4 – с 74,32 кг/ч при ($x_2 = 1,0; x_4 = 1,0$) до тех же максимально возможных 255,38 кг/ч при ($x_2 = 1,0; x_4 = -1,0$).

В математической модели (2) статистически значимыми парным взаимодействиям факторов являются x_1 x_2 и x_3 x_4 . Ввиду того, что целевой задачей является обеспечение времени облучения зернового материала y_2 в 15 с, а по результатам оценки непосредственного влияния факторов на среднее время облучения не удалось выявить значений факторов, удовлетворяющих решению

поставленной задачи (наибольшее время составило 7,13 с), поэтому рассмотрим крайние точки нашей модели (2). Так, в случае взаимодействия факторов x_1, x_2 угол наклона ложа / дна транспортера x_3 и частота тока вибратора x_4 должны фиксироваться на уровне 7° (1,0) и 50 Гц (-1,0) соответственно. А в случае взаимодействия x_3, x_4 факторы зазора выгрузного отверстия x_1 и угла между грузами эксцентриками x_2 фиксируются на уровне 18 мм (1,0) и 90° (1,0) соответственно. Из рисунка 3в следует, что наибольшая разница в значениях среднего времени облучения y_2 наблюдается при зазоре выгрузного отверстия x_1 6 (-1,0) и 18 мм (1,0) при угле между грузами-эксцентриками x_2 в 90° (1,0). В этом случае среднее время облучения y_2 увеличивается с ростом величины зазора выгрузного отверстия x_1 с 7,29 при 6 мм (-1,0) до 16,32 сек при 18 мм (1,0). Также следует отметить, что при углах между грузами-эксцентриками x_2 , близких к 150° (-1,0), в целом снижается отклик критерия y_2 на изменение величины зазора выгрузного отверстия x_1 . Аналогичная ситуация наблюдается при взаимодействии факторов x_3, x_4 . Однако в этом случае наибольший эффект, связанный с ростом среднего времени облучения, оказывает наклон ложа / дна транспортера x_3 при частоте тока вибратора транспортера x_4 70 Гц (-1,0).

Для непосредственного решения обозначенной задачи получения максимальной производительности и при среднем времени облучения зернового материала в течение 15 с воспользовались возможностью Statgraphics по решению оптимизационных компромиссных задач. В результате поставленные цели были достигнуты (таблица 3), а также получены ближайшие значения факторов, обеспечивающие этот результат (таблица 4).

Заключение. В результате проведенного эксперимента получены математические модели (1) и (2), описывающие изменение пропускной

способности и среднего времени облучения на устройстве для обработки зерна злаковых культур токами СВЧ под воздействием подачи зернового материала (зазора выгрузного отверстия x_1), эксцентриситета вращающихся эксцентриков (угла между грузами эксцентриками x_2), наклона ложа / дна транспортера x_3 и частоты вращения эксцентриков вибратора (частоты питающего тока электродвигателя вибратора x_4). Дано описание протекающих процессов при непосредственном влиянии факторов x_1, x_2, x_3 и x_4 и их взаимодействий на критерии оптимизации y_1 и y_2 . Получены необходимые условия для нахождения зернового материала в зоне облучения в течение 15 с и обеспечения производительности вибрационного транспортера в 55,95 кг/ч при подаче 61,5 кг/ч (зазор выгрузного отверстия 16,24 мм); эксцентриситете эксцентриков 3,92 мм (угол между грузами эксцентриками 150 град.); угле наклона ложа / дна транспортера 7° и частоте вращения вала вибратора 2940 ± 30 мин⁻¹ (частота тока вибратора транспортера 50 Гц).

Список источников

1. Зюкин Д.А. Факторы конкурентоспособности российского зерна на мировом рынке и перспективы развития зернового хозяйства в контексте наращивания экспортного потенциала // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24. № 4. С. 531-541. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-04-531-541. EDN: JJCROP.
2. Брагинец А.В., Бахчевников О.Н., Хоменко П.А. Влияние физических и химических способов предпосевной обработки семян озимой пшеницы на ее вегетацию, урожайность и химический состав зерна // Таврический вестник аграрной науки. 2024. № 1 (37). С. 8-20. DOI: 10.5281/zenodo.10925091. EDN: AWLJSV.
3. Технологии и машины для физических методов воздействия на почву, се-

Таблица 3 – Результат оптимизации при решении компромиссной задачи

Наименование и размерность критерия оптимизации	Условное обозначение	Желаемый результат	Фактический результат	Достижение цели, %
Производительность, кг/ч	y_1	Максимум	55,95	35,64
Среднее время облучения, сек.	y_2	15,0	15,0	100

Таблица 4 – Значения факторов при решении компромиссной задачи достижения оптимума

Наименование и размерность фактора	Условное обозначение	Нормированное значение	Фактическое значение
Зазор выгрузного отверстия, мм	x_1	0,71	16,24
Угол между грузами-эксцентриками, град.	x_2	1,0	150
Угол наклона ложа /дна транспортера, град.	x_3	1,0	7
Частота тока вибратора транспортера, Гц	x_4	-1,0	50

- мена и растения / А.А. Завалий [и др.] // *Агроинженерия*. 2021. № 6 (106). С. 11-19. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-6-11-19. EDN: ASCMRB.
4. Митрофанов Д.В. Сравнительная оценка урожайности зерновых культур в зависимости от лимитирующих факторов в условиях почвозащитного земледелия // *Аграрный вестник Урала*. 2024. Т. 24. № 7. С. 870-884. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-870-884. EDN: VATHLM.
5. Мартеха А.Н., Торопцев В.В. Влияние различных способов сушки на физико-механические свойства и всхожесть семян гороха // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. № 1. С. 65-72. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-65-72. EDN: RPIKEU.
6. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding / F.A. Kipriyanov [et al.] // *Journal of Water and Land Development*. 2021. Vol. 49. No. 4-6. P. 74-78. DOI: 10.24425/jwld.2021.137098. EDN: UJVZCF.
7. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Страхов В.Ю. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности применения УФ облучения, СВЧ обработки и искусственного освещения при проращивании зерна пшеницы и ячменя на витаминный корм // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. № 2 (46). С. 42-50. EDN: FDTBKS.
8. Будников Д.А. Моделирование электромагнитного поля в зерновом слое различной плотности // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. № 1 (41). С. 40-45. EDN: YWEEDE.
9. Будников Д.А. Определение коэффициента диэлектрических потерь псевдооживленного слоя зерна // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 3 (46). С. 66. EDN: ZWZEWV.
10. Будников Д.А. Результаты экспериментальных исследований фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. № 3 (43). С. 16-21. EDN: YOINFJ.
11. Черкасова Э.И., Голицыцкий П.В., Антонова У.Ю. Применение СВЧ энергии для обеззараживания зерновой продукции // *Сельский механизатор*. 2024. № 6. С. 21-23. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-6-21-22-23. EDN: BWXNPE.
12. Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating / A. Titlov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. No. 8-97. P. 78-85. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154527. EDN: FZOZWL.
13. Kakati B., Bora D., Bujarbarua S. An eco-friendly, pollution-free process for seed germination and plant yield // *AIP Conference Proceedings*. 2019. P. 020021. DOI: 10.1063/1.5096512. EDN: UCYJOT.
14. Альт В.В., Исакова С.П., Балушкина Е.А. Выбор технологий в растениеводстве: подходы и методы, применяемые в информационных системах // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 15. № 1 (57). С. 52-58. DOI: 10.12737/2073-0462-2020-52-58. EDN: JAWJKV.
15. Чепик Д.А., Колесников А.В. Проблемы материально-технического обеспечения растениеводства // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2022. № 4 (44). С. 24-31. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-4-24-31. EDN: SWUDZN.
16. Rifna E.J., Ratish Ramanan K., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. P. 95-108. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.029. EDN: DYHJAF.
17. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation / I. Ganeev [et al.] // *Acta Agriculturae Slovenica*. 2020. Vol. 115. No. 2. P. 261-271. DOI: 10.14720/aas.2020.115.2.1359. EDN: WKEKPS.
18. Будников Д.А. Система управления экспериментальной установкой электрофизического воздействия на зерно // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 17. № 2 (66). С. 59-67. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-57-63. EDN: DNWNTY.
19. Modeling the Trajectory of the Movement of Grain Material on the Surface of the Vibrating Chute / A. Isupov [et al.] // *Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology: Materials II International Conference*. 2023. Vol. 3011. P. 20016.
20. Белозерова С.В. Исследование конструктивных параметров СВЧ-установки для термообработки зерна // *Наука, образование /и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции*. Нальчик: Изд-во Кабардино-Балкарского ГАУ, 2023. С. 430-434. EDN: GPSMSG.
21. Белозерова С.В. Результаты экспериментальных исследований СВЧ-установки для обработки фуражного зерна // *Передовые достижения науки в молочной отрасли: сборник научных трудов по результатам работы V Международной научно-практической конференции*. Вологда-Молочное: Изд-во Вологодской ГМХА, 2023. С. 217-220. EDN: GLNFCC.
22. Савиных П.А., Белозерова С.В. Влияние предпосевной СВЧ-обработки зерна на качественные показатели семенного материала // *Международный технико-эконо-*

мический журнал. 2022. № 4. С. 100-108. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-85-4-100-108. EDN: ZKANNE.

References

1. Zyukin D.A. Faktory konkurentosposobnosti rossiiskogo zerna na mirovom rynke i perspektivy razvitiya zernovogo khozyaistva v kontekste narashchivaniya eksportnogo potentsiala [Factors of competitiveness of Russian grain on the world market and prospects for development of grain farming in the context of increasing export potential]. *Agricultural Bulletin of the Ural*. 2024; 24(4): 531-541. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-04-531-541. EDN: JJCROP. (In Russ).
2. Braginets A.V., Bakhchevnikov O.N., Khomenko P.A. Vliyanie fizicheskikh i khimicheskikh sposobov predposevnoi obrabotki semyan ozimoi pshenitsy na ee vegetatsiyu, urozhainost' i khimicheskii sostav zerna [The influence of physical and chemical methods of pre-sowing treatment of winter wheat seeds on its vegetation, yield and chemical composition of grain]. *Taurida herald of the agrarian sciences*. 2024; 1(37): 8-20. DOI: 10.5281/zenodo.10925091. EDN: AWLJSV. (In Russ).
3. Zavaliy A.A. et al. Tekhnologii i mashiny dlya fizicheskikh metodov vozdeistviya na pochvu, semena i rasteniya [Technologies and machines for physical methods of influence on soil, seeds and plants]. *Agricultural engineering*. 2021; 6(106): 11-19. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-6-11-19. EDN: ASCMRB. (In Russ).
4. Mitrofanov D.V. Sravnitel'naya otsenka urozhainosti zernovykh kul'tur v zavisimosti ot limitiruyushchikh faktorov v usloviyakh pochvozashchitnogo zemledeliya [Comparative assessment of grain crop yields depending on limiting factors in conditions of soil conservation agriculture]. *Agricultural Bulletin of the Ural*. 2024; 24(7): 870-884. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-870-884. EDN: VATHLM. (In Russ).
5. Martekha A.N., Toroptsev V.V. Vliyanie razlichnykh sposobov sushki na fiziko-mekhanicheskie svoystva i vskhozhest' semyan gorokha [The influence of different drying methods on the physical and mechanical properties and germination of pea seeds]. *Agricultural engineering*. 2024; 26(1): 65-72. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-65-72. EDN: RPIKEU. (In Russ).
6. Kipriyanov F.A. et al. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding. *Journal of Water and Land Development*. 2021; 49(4-6): 74-78. DOI: 10.24425/jwld.2021.137098. EDN: UJVZCF.
7. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Strakhov V.Yu. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy po otsenke effektivnosti primeneniya UF oblucheniya, SVCh obrabotki i iskusstvennogo osveshcheniya pri prorashchivaniy zerna pshenitsy i yachmenya na vitaminnyi korm [Results of experimental studies to assess the effectiveness of using UV irradiation, microwave processing and artificial lighting in the germination of wheat and barley grain for vitamin feed]. *Don agrarian science bulletin*. 2019; 2(46): 42-50. EDN: FDTBKS. (In Russ).
8. Budnikov D.A. Modelirovanie elektromagnitnogo polya v zernovom sloe razlichnoi plotnosti [Modeling of electromagnetic field in grain layer of different density]. *Don agrarian science bulletin*. 2018; 1(41): 40-45. EDN: YWEEDE. (In Russ).
9. Budnikov D.A. Opredelenie koeffitsienta dielektricheskikh poter' psevdoozhizhennogo sloya zerna [Determination of the dielectric loss coefficient of a fluidized bed of grain]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2017; 3(46): 66. EDN: ZWZEWV. (In Russ).
10. Budnikov D.A. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy faktora dielektricheskikh poter' zernovozdushnoi smesi [Results of experimental studies of the dielectric loss factor of grain-air mixture]. *Don agrarian science bulletin*. 2018; 3(43): 16-21. EDN: YOIHFJ. (In Russ).
11. Cherkasova E.I., Golnitsky P.V., Antonova U.Yu. Primenenie SVCh energii dlya obezzarazhivaniya zernovoi produktsii [Application of microwave energy for disinfection of grain products]. *Selskiy Mehanizator*. 2024; (6): 21-23. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-6-21-22-23. EDN: BWXNPE. (In Russ).
12. Titlov A. et al. Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019; 1(8-97): 78-85. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154527. EDN: FZOZWL.
13. Kakati B., Bora D., Bujarbarua S. An eco-friendly, pollution-free process for seed germination and plant yield. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 020021. DOI: 10.1063/1.5096512. EDN: UCYJOT.
14. Alt V.V., Isakova S.P., Balushkina E.A. Vybor tekhnologii v rastenievodstve: podkhody i metody, primenyaemye v informatsionnykh sistemakh [Selection of technologies in plant growing: approaches and methods applied in information systems]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2020; 15(1-57): 52-58. DOI: 10.12737/2073-0462-2020-52-58. EDN: JAWJKV. (In Russ).
15. Chepik D.A., Kolesnikov A.V. Problemy material'no-tekhnicheskogo obespecheniya rastenievodstva [Problems of logistical support for plant growing]. *Zernobobovye*

i krupyanye kul'tury. 2022; 4(44): 24-31. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-4-24-31. EDN: SWUDZN. (In Russ).

16. Rifna E.J., Ratish Ramanam K., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 2019; (86): 95-108. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.029. EDN: DYHJAF.

17. Ganeev I. et al. Intensification of the drying process of small seed oilseeds using microwave electromagnetic radiation. *Acta Agriculturae Slovenica*. 2020; 115(2): 261-271. DOI: 10.14720/aas.2020.115.2.1359. EDN: WKEKPS.

18. Budnikov D.A. Sistema upravleniya eksperimental'noi ustanovkoi elektrofizicheskogo vozdeistviya na zerno [Control system of the experimental setup for electrophysical impact on grain]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2022; 17(2-66). С. 59-67. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-57-63. EDN: DNWNTY. (In Russ).

19. Isupov A. et al. Modeling the Trajectory of the Movement of Grain Material on the Surface of the Vibrating Chute. *Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology: Materials II International Conference*. 2023; (3011): 20016.

20. Belozeroва S.V. Issledovanie konstruktivnykh parametrov SVCh-ustanovki dlya termoobrabotki zerna [Study of design parameters of microwave installation for heat treatment of grain]. Collection of scientific papers based on the materials of the III International scientific and practical conference «Science, education and business: a new view or a strategy for integration interaction». Nalchik: Izd-vo Kabardino-Balkarskii GAU; 2023: 430-434. EDN: GPSMSG. (In Russ).

21. Belozeroва S.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy SVCh-ustanovki dlya obrabotki furazhnogo zerna [Results of experimental studies of microwave installation for processing feed grain]. Collection of scientific papers on the results of the V International scientific and practical conference «Advanced scientific achievements in the dairy industry». Vologda-Molochnoe: Izd-vo Vologodskaya GMKhA; 2023: 217-220. EDN: GLNFCC. (In Russ).

22. Savinykh P.A., Belozeroва S.V. Vliyanie predposevnoi SVCh-obrabotki zerna na kachestvennye pokazateli semennogo materiala [The influence of pre-sowing microwave treatment of grain on the quality indicators of seed material]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal*. 2022; (4): 100-108. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-85-4-100-108. EDN: ZKANNE. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Белозерова С.В. – проведение экспериментальных исследований, написание исходного текста; итоговые выводы.

Савиных П.А. – научное руководство; концепция исследования; итоговые выводы.

Исупов А.Ю. – обработка материала; научное редактирование текста; доработка текста.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Belozeroва, S.V. – carrying out experimental studies, writing the original text; final conclusions.

Savinykh, P.A. – scientific guidance; research concept; final conclusions.

Isupov, A.Yu. – processing of the material; scientific text editing; follow-up revision of the text.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

С.В. Белозерова – AuthorID 1059730.

П.А. Савиных – доктор технических наук, профессор; AuthorID 426517.

А.Ю. Исупов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 761222.

Information about the authors

S.V. Belozeroва – AuthorID 1059730.

P.A. Savinykh – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 426517.

A.U. Isupov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 761222.

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; одобрена после рецензирования 31.10.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 03.10.2024; approved after reviewing 31.10.2024; accepted for publication 17.12.2024.