

На правах рукописи



БЕЛОЗЕРОВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Княгинино – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина» (ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА) на кафедре «Технические системы в агробизнесе»

Научный руководитель: **Савиных Петр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты: **Аксенов Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», главный научный сотрудник лаборатории машинных технологий возделывания и уборки картофеля и корнеплодов

Ганеев Ильдар Рафаилович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», декан факультета заочного обучения

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный аграрный университет»

Защита состоится 7 ноября 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 72.2.016.02 при ГБОУ ВО НГИЭУ по адресу: 606340, Россия, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д.22а, корп.1, ауд. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБОУ ВО НГИЭУ и на официальном сайте <https://ngieu.ru/state-scientific-attestation/dissovet-72201602/>.

Автореферат разослан _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Тареева Оксана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В распоряжении Правительства РФ от 10 августа 2019 года за № 1796-р «Долгосрочная стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 года» обозначена необходимость в разработке инновационных подходов выращивания зерновых культур, в том числе обеспечение производства фуражного зерна не менее 50 млн. т при увеличении производства продукции скота и птицы до 17 млн. т.

На территории России почти три четверти производства от всего зернового комплекса РФ сосредоточены в регионах Центрального, Южного, Приволжского и Сибирского федеральных округов. Тогда как регионы Северо-Западного, Уральского, Дальневосточного и Северо-Кавказского федеральных округов не всегда могут обеспечить себя достаточным объемом собственного производства зерновых культур. Тем самым не обеспечивается их продовольственная безопасность по этому показателю, что, в конечном счете, сказывается на стоимости зерна в этих регионах, вызванной вопросами транспортировки и хранения зерна.

В связи с чем уже сейчас требуются технологии, способные обеспечить устойчивый прирост продукции сельскохозяйственного производства. Примером этого может служить технология обработки семенного материала в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (далее ЭМП СВЧ) с целью мобилизации энергии роста в зерне. Это в конечном итоге способствует повышению урожайности зерновых культур за счет улучшения всхожести зернового материала и устойчивости к вредителям и болезням. По мнению многих зарубежных и отечественных ученых, предпосевную обработку семенного материала в ЭМП СВЧ относят к «зеленым технологиям», то есть к обеспечивающим снижение отрицательного влияния на окружающую среду при оптимизировании издержек на производство.

Также согласно Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017...2030 годы внедрение обработки семенного зерна в ЭМП СВЧ относится к инновационным решениям, способствующим росту производства высококачественных кормов для всех групп животных. Это позволит применять безопасные технологии при выращивании зерновых культур и обеспечить устойчивое развитие кормопроизводства.

Степень разработанности темы. Вопросы разработки технических средств для производства зерновых культур рассматриваются многими отечественными и зарубежными учеными, что нашло свое отражение в фундаментальных исследованиях. В области использования ЭМП СВЧ в аграрном секторе можно выделить работы А.А. Бабенко, С.В. Вендина, А.Н. Васильева, И.А. Рогова, О.М. Соболевой и др.

Разработка технических средств для обработки зерновых культур в ЭМП, в том числе и СВЧ, отражена в исследованиях: А.Г. Аксенова, А.А. Бабенко, А.А. Белова, М.В. Белова, Д.А. Будникова, А.Н. Васильева, А.А. Васильева, С.В. Вендина, И.Р. Ганеева, А.С. Казаковой, Ф.А. Киприяно-

ва, А.В. Лыкова, Г.А. Максимова, А.Н. Малахова, Н.П. Мишурова, С.В. Некрутман, В.И. Пахомова, Г. Пюшнера, И.А. Рогова, П.А. Савиных, Г.В. Степанчука, М.В. Сухановой, В.И. Сыроватка и др.

Эти работы предоставляют теоретическую основу для проведения исследования по обоснованию конструктивно-технологических параметров технических средств для обработки семенного материала злаковых культур в ЭМП СВЧ.

Несмотря на наличие множества научных работ в области применения электромагнитного излучения в народном хозяйстве, необходимо отметить, что недостаточно проработаны теоретические и научно-практические аспекты технических средств, используемых для облучения семян зерновых культур в ЭМП СВЧ, и, в частности, в условиях Северо-Западного федерального округа, относящегося к зоне рискованного земледелия.

Цель работы. Совершенствование конструкции и оптимизация конструктивно-технологических параметров установки для обработки семенного материала злаковых культур в электромагнитном поле сверхвысокой частоты для повышения его качества.

Объект исследования. Технологический процесс предпосевной обработки зерна в электромагнитном поле СВЧ-диапазона.

Предмет исследования. Конструктивно-технологические параметры установки для предпосевной СВЧ-обработки зерна, обеспечивающие повышение урожайности злаковых культур.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

- в разработке функциональной схемы экспериментальной установки предпосевной обработки зерна в электромагнитном поле СВЧ-диапазона (патент на изобретение RU 2754444 C1);

- в получении математической модели движения частицы по наклонной вибрирующей поверхности установки для предпосевной обработки зерна (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023615207);

- в получении математической модели рабочего процесса, связывающей режимные параметры (частота вращения, эксцентриситет грузов-эксцентриков, угол наклона желоба вибротранспортера) с производительностью установки, временем нахождения зерна в ЭМП СВЧ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке установки для предпосевной обработки семян зерновых культур в ЭМП СВЧ, способствующей за счет повышения качества посевного семенного материала (всхожести и энергии роста семян) росту урожайности зерновых культур. В результате создания равномерного воздействия ЭМП СВЧ и изменения его продолжительности обеспечивается возможность обработки зерна, отличающегося не только формой, но и размером.

Экспериментальная установка для предпосевной СВЧ-обработки семенного материала прошла ведомственные испытания и используется в технологическом процессе выращивания зерновых культур на опытном поле

ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, а также в ООО «Зазеркалье» и в СПК «Колхоз Андога» Вологодской области.

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении научно-исследовательских тем:

– FNWE-2022-0002 «Создание высокоэффективных машинных технологий и технических средства для механизации для растениеводства и животноводства, адаптированных к особенностям климатических условий Северо-Востока Европейской части России» (№ 1021060407719-4);

– «Создание технических средств и технологий для предпосевной обработки зерна магнитным полем СВЧ диапазона в условиях Северо-Западного Нечерноземья России» (регистрационный номер в ЕГИСУ НИ-ОКТР 123020700068-9).

Материалы научного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА при изучении дисциплины «Сельскохозяйственные машины» по направлению подготовки высшего образования 35.03.06 Агроинженерия профиль «Технические системы в агробизнесе».

Методология и методы исследований. Исследование проведено на основе системного подхода, при котором используется сочетание теоретических и экспериментальных методов, в том числе в лабораторных и производственных условиях.

Определение рациональных параметров проводилось в лабораторных и производственных условиях с использованием статистических, математических и физических методов. Обработка результатов исследований выполнялась с использованием пакета программ Excel и Statgraphics, а также программы «Моделирование траектории движения частицы по цилиндрической вибрирующей поверхности» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023615207).

Положения, выносимые на защиту:

– конструктивно-технологическая схема установки для предпосевной обработки зерна в электромагнитном поле СВЧ-диапазона;

– математическая модель движения частиц по транспортирующему желобу установки в зависимости от геометрических параметров и кинематических режимов его работы;

– рациональные конструктивные и технологические параметры транспортирующего устройства установки для предпосевной обработки зерна, обеспечивающие равномерное облучение семенного материала;

– технико-экономическая и энергетическая эффективность работы установки.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность выводов исследования, представленного в диссертации, подтверждается экспериментальными исследованиями, а также положительными результатами лабораторных и производственных испытаний установки для предпосевной СВЧ-обработки семян злаковых культур.

Основные положения исследования, выводы и рекомендации работы докладывались и обсуждались на одиннадцати международных и всероссийских (национальных) научно-практических конференциях, прошедших с 2022 по 2025 год. В их числе: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам», ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА (2022, 2023, 2025 гг.); Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК», ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский ГАУ (2022 г.); Международная научно-практическая конференция «От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК», ФГБОУ ВО Уральский ГАУ (2022 г.); Всероссийские (национальные) научно-практические конференции «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты», ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ (2022 и 2023 гг.); Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные тенденции развития российской науки», ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ (2023 г.); Международная научная конференция «Аграрная наука и инновационное развитие АПК: состояние, проблемы и перспективы», ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА (2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Современное животноводство и инновации в технологии производства продуктов питания, аспекты экологической, производственной и гигиенической безопасности», ФГБОУ ВО Донской ГАУ (2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Молодежная наука – развитию агропромышленного комплекса», ФГБОУ ВО Курский ГАУ (2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях, 2 статьи в изданиях, рецензируемых базами Scopus, 6 статей РИНЦ по результатам научных конференций. Получен патент РФ на изобретение RU 2754444 C1 и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023615207.

Структура и объем диссертации. Диссертационное исследование изложено на 152 страницах. Включает введение, 5 глав, заключение, список литературы из 167 наименований, в том числе 27 на иностранных языках, 62 рисунка, 22 таблицы, а также 12 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, цель, объект, предмет и методы исследования. Представлена научная новизна, практическая ценность и апробация работы, реализация и внедрение результатов диссертационных исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса обработки зерна в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ)» представлен обзор технических средств и технологий, используемых при предпосевной обработке семенного материала. Проанализированы технические средства для предпосев-

ной обработки семян злаковых культур с использованием электромагнитного поля СВЧ-диапазона. Выявлены их недостатки и преимущества.

Обработка семян в ЭМП СВЧ в сравнении с другими методами является перспективной, так как не оказывает вредного воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал, экологичная, легко автоматизируется и встраивается в существующие технологические линии подготовки семенного материала.

Литературный обзор показал актуальность исследования влияния ЭМП СВЧ на обеспечение равномерности нагрева, посевные качества и зараженность семян различных сельскохозяйственных культур, отличающихся по форме и размеру зерен. Для решения этого вопроса перспективным является перемещение зерна в зоне обработки с обеспечением перемешивания зерновок, в том числе в псевдооживленном слое зерна.

В соответствии с этим поставлены следующие задачи исследования:

- разработать конструктивно-технологическую схему установки для СВЧ-обработки семян злаковых культур;
- разработать математическую модель движения частицы в зависимости от геометрических параметров и кинематических режимов работы вибрирующего желоба установки для предпосевной обработки зерна;
- провести экспериментальные исследования по установлению рациональных конструктивных и технологических параметров транспортирующего устройства установки для предпосевной обработки зерна, обеспечивающих равномерное облучение семенного материала;
- обосновать экономическую эффективность предпосевной обработки семян зерновых культур электромагнитным полем СВЧ-диапазона.

Во второй главе «Теоретические исследования движения зернового материала по вибрирующему вогнутому желобу» представлено теоретическое обоснование движения зернового материала по вибрирующему вогнутому желобу. Проведен теоретический расчет и моделирование траектории движения частицы на рабочей поверхности вибротранспортера.

В предлагаемой конструкции проблема уменьшения неравномерности воздействия ЭМП СВЧ решается следующим образом (рисунок 1): эксцентрики 1, помимо продольных и вертикальных колебаний желоба, за счет диаметрально противоположного положения на оси двигателя, вызывают колебания пружинной подвески 2 в поперечном сечении, а пружинная подвеска придает поперечным колебаниям дугообразные движения желобу транспортера 3, формируя при этом поворотно-колебательные движения в плоскости поперечного сечения желоба, тем самым днище и стенки транспортера формируют динамическую камеру, изменяющую свое положение относительно неподвижного СВЧ-излучателя. Колебания днища и стенок желоба транспортера, постоянно изменяя условия отражения и рассеивания волн, выравнивают напряженность электромагнитного поля, повышая равномерность и эффективность обработки семян.

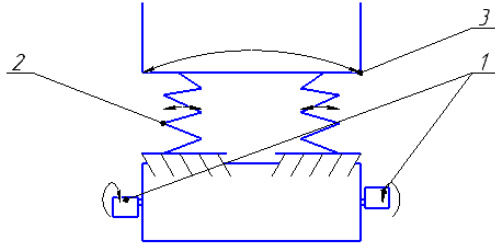
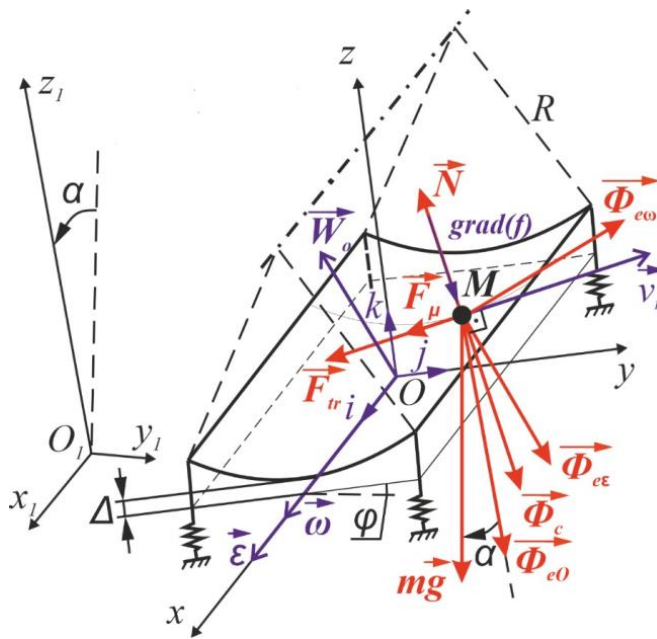


Рисунок 1 – Схема поворотных колебательных движений желоба, где: 1 – эксцентрики, 2 – пружинная подвеска, 3 – желоб вибрационного транспортера

Вогнутая поверхность вибротранспортера представляет собой цилиндр радиуса R . Ось цилиндра имеет наклон к горизонту под углом α . Поверхность совершает поступательные колебания вдоль неподвижных осей Ox_1, Oz_1 и вращательные колебания вокруг оси Ox , которая параллельна оси цилиндра и проходит через полюс O (рисунок 2). Двигатель вибратора жестко закреплен снизу подпружиненного цилиндрического лотка, по которому перемещаются частицы.



$Oxyz, O_1x_1y_1z_1$ – неподвижная и подвижная система координат;
 i, j, k – единичные вектора;
 $m\vec{g}$ – сила тяжести;
 $\vec{N}$ – нормальная реакция поверхности;
 $\vec{F}_{tr}$ – сила сухого трения скольжения;
 $\vec{F}_e$ – переносная сила инерции;
 $\vec{F}_c$ – сила инерции Кориолиса;
 $\vec{F}_\mu$ – сила сопротивления относительно движению со стороны соседних частиц;
 $\vec{v}_r$ – относительная скорость частицы;
 $\vec{\epsilon}, \vec{\omega}, \vec{\varphi}$ – угловое ускорение, скорость и перемещение желоба;
 $\vec{W}_0$ – ускорение полюса O ;
 $grad(f)$ – вектор-градиент к поверхности;
 α, R, Δ – угол наклона, радиус и статическая деформация упругой подвески желоба.

Рисунок 2 – Силы, действующие на частицу в относительном движении

Переносное движение зерновки за время t обеспечивается двумя эксцентриками, которые расположены на разных концах вала, вращающегося с частотой p , и описывается уравнениями:

для поступательной составляющей

$$\begin{cases} x_1 = A_x \cos(2p \cdot t); \\ z_1 = A_z \sin(2p \cdot t); \end{cases} \quad (1)$$

и для вращения вокруг оси Ox

$$\varphi = A_\varphi \sin(p \cdot t). \quad (2)$$

Эксцентрики смонтированы в противофазе друг другу, поэтому за один оборот двигателя полюс O совершает два поступательных колебания с частотой

той $2p$ и амплитудами A_x, A_z . Цилиндрический лоток поворачивается на угол φ вокруг оси Ox с амплитудой вращательных колебаний A_φ и частотой p .

Дифференциальное уравнение относительного движения частицы по поверхности лотка имеет вид:

$$m\vec{W}_r = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{tr} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c + \vec{F}_\mu, \quad (3)$$

где m – масса частицы; $\vec{W}_r$ – относительное ускорение; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; $\vec{N}$ – нормальная реакция поверхности; $\vec{F}_{tr}$ – сила сухого трения скольжения; $\vec{\Phi}_e$ – переносная сила инерции; $\vec{\Phi}_c$ – кориолисова сила инерции; $\vec{F}_\mu$ – сила сопротивления относительному движению со стороны соседних частиц.

Дифференциальное уравнение движения после отрыва от поверхности запишем так:

$$m\vec{W}_r = m\vec{g} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c + \vec{F}_\mu. \quad (4)$$

Определим силы, входящие в правую часть уравнений (3) и (4), и спроецируем уравнение (3) на оси координат:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin(\alpha) - \eta |\vec{N}| \frac{\dot{x}}{|\vec{v}_r|} - \mu \cdot m\dot{x} - mW_{Ox} \\ m\ddot{y} = 2\lambda \cdot y - \eta |\vec{N}| \frac{\dot{y}}{|\vec{v}_r|} - \mu \cdot m\dot{y} + m\omega^2 y + m\epsilon z + 2m\omega\dot{z} \\ m\ddot{z} = -mg \cos(\alpha) + 2\lambda \cdot (z - (R + \Delta)) - \\ - \eta |\vec{N}| \frac{\dot{z}}{|\vec{v}_r|} - \mu \cdot m\dot{z} - mW_{Oz} + m\omega^2 z - m\epsilon y - 2m\omega\dot{y} \end{cases}. \quad (5)$$

При движении зерновки по поверхности две из трех координат (5) независимы, а третья определяется через уравнение поверхности. Она нужна для определения множителя Лагранжа λ , который определяет нормальную реакцию цилиндрической поверхности. При обращении в нуль множителя Лагранжа λ частица отрывается от поверхности, и далее расчет идет по решению уравнения (4) в проекции на подвижные оси координат до тех пор, пока расстояние от оси цилиндра до частицы не станет равным или большим R :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin(\alpha) - \mu \cdot m\dot{x} \\ m\ddot{y} = -\mu \cdot m\dot{y} + m\omega^2 y + m\epsilon z + 2m\omega\dot{z} \\ m\ddot{z} = -mg \cos(\alpha) - \mu \cdot m\dot{z} - mW_O + m\omega^2 z - m\epsilon y - 2m\omega\dot{y} \end{cases}. \quad (6)$$

Затем подставляем конечные значения скоростей этого этапа движения в начальные условия нового этапа движения, описываемого по уравнениям (5), продолжаем решение до очередного отрыва от поверхности. Определение начальных скоростей после соударения с поверхностью проводим в соответствии с теорией квазипластического удара, и, учитывая, что поверхность цилиндра слабо искривлена по отношению к плоскости (x, y) , полага-

ем, что относительные скорости частицы после соударения меняются по выражениям:

$$\begin{cases} \dot{x}_K = \dot{x}_H(1 - \theta) \\ \dot{y}_K = \dot{y}_H(1 - \theta) \\ \dot{z}_K = -\frac{y\dot{y}_K}{\sqrt{R^2 - y^2}} \end{cases}, \quad (7)$$

где θ – эмпирический коэффициент, имеющий значение в пределах $0,3 < \theta < 0,7$; индекс "H" – обозначает начало удара, а "K" – окончание удара.

Кроме того, полагаем, что время удара существенно меньше, чем время полета частицы, то есть за время удара положение лотка не меняется.

С целью описания движения псевдооживленного слоя разработана программа «Моделирование траектории движения частицы по цилиндрической вибрирующей поверхности» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023615207), реализующая данный алгоритм расчета движения частицы на языке C#, для моделирования траектории движения частицы по наклонной вибрирующей цилиндрической поверхности, позволяющая на основании исходных данных рассчитать траекторию движения как отдельной зерновки, так и слоя обрабатываемого зерна.

Кроме этого, программой предусмотрено визуальное представление траектории, что обеспечивает наглядность результатов расчета. Программа позволяет выбрать наиболее подходящую геометрическую форму поверхности транспортера и получить рациональные режимы работы установки при расчете движения частицы по вибрирующей поверхности. С учетом достаточно обширного объема входных параметров предоставляется возможность для моделирования поведения частицы на цилиндрической поверхности, в том числе математическая модель, реализуемая в программе, может быть применена для проектирования технологических линий и оборудования, например, предпосевной обработки зерна в ЭМП СВЧ.

Для предварительного поиска диапазона варьирования параметров в ходе проведения экспериментальной части исследования проведено моделирование движения частицы по поверхности желоба с анализом графиков, полученных в результате расчета траектории движения частицы при разных значениях варьируемых параметров: амплитуда колебаний по оси Oх, угловая скорость ротора вибратора, радиус цилиндрической поверхности желоба вибротранспортера, продольный угол наклона лотка к горизонту и других.

В связи с чем для обеспечения устойчивого движения частицы вдоль оси желоба, минимального отклонения от нее и недопущения скопления зернового материала в точке начала движения и смещения частицы к периферии необходимо обеспечивать амплитуду колебаний вдоль оси Oх не более $15 \cdot 10^{-4}$ м, частоту вращения эксцентриков ω следует принимать не более 120 с^{-1} , искривление дна желоба R менее 500 м с увеличением продольного угла наклона желоба α для роста гравитационных сил.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследо-

ваний» изложена программа исследований, описаны экспериментальные установки, общепринятые и частные методики исследований и проверки гипотезы о соответствии результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

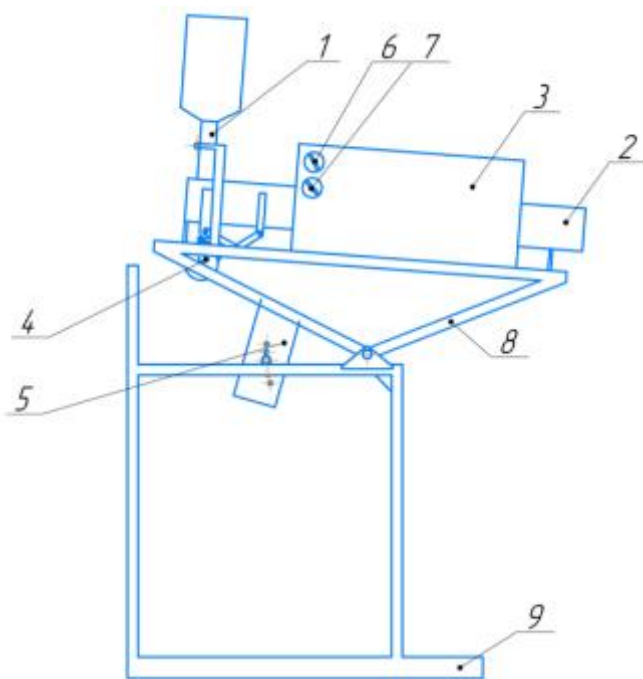
Экспериментальные исследования проводились на опытном образце установки (рисунок 3, а), изготовленной на базе ФГБОУ Вологодская ГМХА в соответствии с конструктивно-технологической схемой согласно патенту на изобретение № 2754444 (рисунок 3, б).

Работает установка следующим образом: зерно из бункер-питателя гравитационного типа со щелевым дозатором 1 поступает на желоб вибротранспортера 2, соединенный посредством пружинной подвески с поворотной рамой 8, изменяющей свое положение относительно горизонта с помощью механизма изменения угла наклона желоба 5.

Зерно, находящееся в желобе вибротранспортера, за счет вибрации образует зерновой слой в псевдооживленном состоянии, который перемещается в СВЧ-камеру 3, где подвергается воздействию источника излучения ЭМП СВЧ с последующим сходом обработанного материала в приемную тару. Поворотная рама 8 соединена через резиновые демпферы с П-образной рамой-остовом 9, которая установлена на анкерных болтах.



а



б

Рисунок 3 – экспериментальная установка (а) и ее конструктивно-технологическая схема (б): 1 – бункер-питатель гравитационного типа со щелевым дозатором; 2 – желоб вибротранспортера, установленный на пружинной подвеске; 3 – СВЧ-камера; 4 – электродвигатель с диаметрально установленными дисбалансными устройствами; 5 – механизм изменения угла наклона желоба; 6 – активатор первого источника СВЧ-излучения; 7 – активатор второго источника СВЧ-излучения; 8 – поворотная рама; 9 – П-образная рама-остов

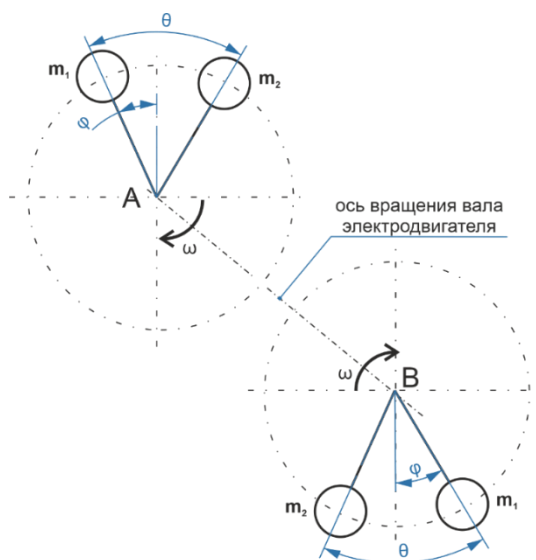


Рисунок 4 – Схема к определению угла между грузами-эксцентриками дисбалансного устройства

Желоб вибротранспортера установлен на пружинной подвеске, к нему жестко прикрепляется электродвигатель с дисбалансным устройством, представляющим диаметрально и противоположно разнесенные по концам вала электродвигателя эксцентрики. Эксцентрик состоит из двух одинаковых стержней (грузов), перпендикулярно расположенных к оси вала электродвигателя. Благодаря изменению угла между стержнями (грузами) осуществляется изменение эксцентриситета эксцентрика (рисунок 4).

Программа экспериментальных исследований включала методики: проведения исследований по оценке влияния конструктивно-технологических параметров экспериментальной установки на ее пропускную способность; проведения экспериментальных исследований влияния конструктивных параметров установки на время СВЧ-обработки и пропускную способность; оценки посевных свойств зернового материала; проведения полевого опыта.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты исследования влияния СВЧ-обработки при неподвижном и псевдооживленном состоянии слоя семян на энергию их прорастания и всхожесть, влияния конструктивно-технологических параметров вибротранспортера на время движения зернового слоя и оптимизация конструктивно-технологических параметров установки, влияния предпосевной СВЧ-обработки зерна на количество всходов и урожайность.

На основании проведенных исследований распределения температуры на поверхности неподвижного и подвижного (псевдооживленного) слоя зерна при воздействии СВЧ-излучения установлено, что применение псевдооживленного слоя позволяет более плавно контролировать текущую и критическую температуру нагрева семян. Также установлено, что при воздействии СВЧ-излучения с установленной мощностью 900 Вт наилучшие показатели энергии роста и всхожести семян получены при продолжительности обработки в течение 15 с (рисунок 5). Поэтому в ходе дальнейших исследований следует принять время СВЧ-обработки зерна в течение 15 с.

В ходе предварительных исследований лабораторной установки по оценке влияния конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих получение максимальной производительности / минимального времени движения зернового материала, было установлено, что для получения макси-

мальной пропускной способности (минимального времени движения) зернового материала следует рассматривать частоты вращения дисбалансного механизма от 2500 до 4000 мин⁻¹. Изменение угла наклона вибротранспортера от 0 до 15° позволяет достаточно равномерно регулировать время движения зернового материала.

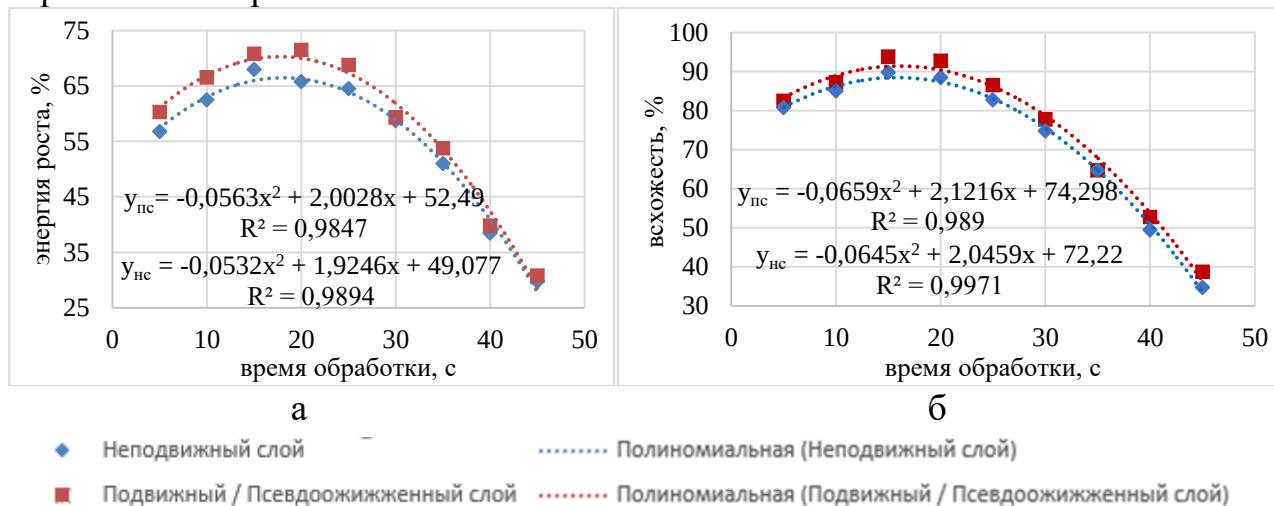


Рисунок 5 – Энергия прорастания (а) и всхожесть (б) семян в зависимости от продолжительности СВЧ-обработки подвижного / псевдооживленного и неподвижного слоя

Установление оптимальных конструктивно-технологических параметров вибротранспортера лабораторной установки, обеспечивающих максимальную производительность и среднее время облучения в 15 с, осуществлено с помощью плана Бокса-Бенкина для четырех факторов. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных с последующим исключением факторов, незначительно влияющих на критерии оптимизации и их взаимодействий (со статистической значимостью менее 5%) получены математические модели рабочего процесса (8) и (9).

$$y_1 = 105,86 + 28,18x_1 - 40,11x_2 - 40,48x_3 + 14,56x_4 - 50,19x_1^2 + 24,42x_2x_3 - 26,0x_2x_4, \quad (8)$$

$$y_2 = 4,54 + 2,59x_1 + 1,30x_2 + 2,58x_3 - 1,56x_4 + 1,93x_1x_2 - 1,83x_3x_4, \quad (9)$$

где x_1 – зазор выгрузного окна, мм; x_2 – угол между грузами-эксцентриками, град.; x_3 – угол наклона ложа / дна транспортера, град.; x_4 – частота тока электродвигателя дисбалансного механизма, Гц; y_1 – производительность, кг/ч; y_2 – среднее время облучения, с.

Статистическая оценка показала адекватность полученных математических моделей при значимости $\alpha=0,05$ и достаточно хорошую (R-squared более 80%) функциональную зависимость между факторами.

Оценку математических моделей по непосредственному воздействию факторов на критерии оптимизации осуществляли с помощью графиков

непосредственного влияния факторов, которые приведены на рисунке 6.

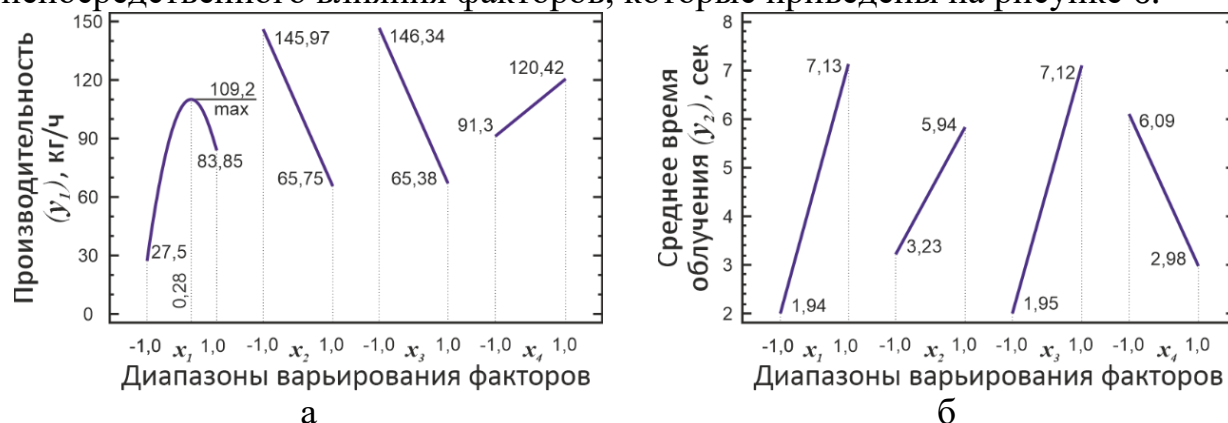


Рисунок 6 – Зависимости влияния факторов x_1, x_2, x_3 и x_4 на пропускную способность y_1 и среднее время облучения материала y_2

Для решения компромиссной задачи достижения максимальной пропускной способности и обеспечения среднего времени облучения зернового материала в течение 15 с воспользовались функцией для решения оптимизационных задач пакета программ Statgraphics (таблица 1).

Таблица 1 – Значения факторов при оптимуме

Фактор		Значение	
Условное обозначение	Наименование и размерность	Нормированное	Фактическое
x_1	Зазор выгрузного отверстия, мм	0,71	16,24
x_2	Угол между грузами-эксцентриками, град.	1,0	150
x_3	Угол наклона ложа /дна транспортера, град.	1,0	7
x_4	Частота вращения дисбалансного механизма, мин ⁻¹ (частота тока электродвигателя, Гц)	-1,0	2940 (50)

Таким образом, минимально необходимые условия для нахождения зернового материала в зоне облучения в течение 15 секунд следующие: зазор выгрузного отверстия 16 мм, угол между грузами-эксцентриками 150 град., угол наклона ложа /дна транспортера 7 град., частота тока электродвигателя дисбалансного механизма 50 Гц с обеспечением наиболее возможной в этих условиях пропускной способности вибрационного транспортера в 55,95 кг/ч.

Для оценки полевой всхожести и урожайности использован яровой ячмень сорта «Сонет», который возделывался на опытном поле ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА с 2021 по 2024 год. Исходная всхожесть зерна составляла 92%. Зерновой материала подвергался предпосевной обработке в ЭМП СВЧ излучателем мощностью 900 Вт в подвижном и неподвижном слое течение 15 с. В качестве контроля использовалось не подвергнутое предпосевной обработке зерно.

Анализ динамики появления всходов для каждой группы показал, что у семян, подвергшихся предпосевной обработке в ЭМП СВЧ, наблюдаются более дружные всходы, а количество появившихся ростков больше, чем в кон-

трольной группе. При этом семена, подвергнутые обработке ЭМП СВЧ в подвижном слое, имеют от 3 до 8% большее количество всходов по сравнению с семенами, обработанными в неподвижном слое.

Данные урожайности говорят о преимуществе посевов зерна, подвергнутого СВЧ-обработке, над контрольной группой – без предпосевной обработки. Так урожайность зерна, обработанного в неподвижном слое, превышает контроль на 1,5...2,6 ц/га (2,8...10,9%), а в подвижном (псевдооживленном) слое на 3,2...6,3 ц/га (8,6...16,8%).

В пятой главе «Результаты производственных испытаний и технико-экономическая оценка установки для предпосевной обработки зерна» приведены результаты производственных испытаний установки и проведен расчет технико-экономической оценки использования предпосевной СВЧ-обработки для семенного материала злаковых культур.

По результатам производственных испытаний в хозяйствах применение СВЧ-облучения при предпосевной обработке семян позволяет снизить уровень зараженности семенного материала с 33-38% до 8-9%, получить всхожесть семенного материала 95%, повысить урожайность на 8,3% в сравнении с традиционной технологией.

Срок окупаемости капиталовложения при сравнении предлагаемой СВЧ-установки с аналогом (патент RU 2498551 C1) составит 2,2 месяца. Годовая экономия денежных затрат при использовании СВЧ-установки составит 274,4 тыс. руб.

Определение экономической эффективности альтернативного варианта предпосевной обработки зерна в хозяйствах – технологии обработки семян химическими и биологическими препаратами, например, «Ламадор Про» протравлителем семян ПС-10 – в сравнении с СВЧ-установкой для предпосевной обработки семенного зерна показало, что внедрение предпосевной СВЧ-обработки позволяет получать дополнительный ежегодный доход 372 тыс. руб. при сроке реализации проекта 0,98 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана конструктивно-технологическая схема установки для предпосевной обработки зерна в электромагнитном поле сверхвысокой частоты, содержащая остов, бункер с дозирующим устройством, СВЧ-камеру с магнетронами, вибротранспортер с пружинной подвеской, закрепленный на поворотной раме, на концах электродвигателя которого диаметрально противоположно расположены эксцентрики, что позволяет обрабатывать зерновой материал в псевдооживленном слое (патент РФ № 2754444).

2. Получена математическая модель движения частицы зернового материала по цилиндрической поверхности желоба вибротранспортера (б) в зависимости от его конструктивно-технологических параметров, а на ее основе разработана программа «Моделирование траектории движения частицы по цилиндрической вибрирующей поверхности» для моделирования траектории движения частицы по наклонной вибрирующей цилиндрической поверхности

желоба, позволяющая по исходным данным рассчитать траекторию движения как отдельной зерновки, так и слоя обрабатываемого материала (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023615207).

3. Экспериментально установлены рациональные конструктивно-технологические параметры установки для предпосевной обработки зерна в электромагнитном поле СВЧ: угол между грузами эксцентриками 150° (эксцентриситет 3,92 мм), угол наклона ложа / дна транспортера 7° и частота вращения вала дисбалансного механизма $2940 \pm 30 \text{ мин}^{-1}$ (частота тока электродвигателя дисбалансного механизма 50 Гц), при этом оптимальная продолжительность нахождения зерна в зоне ЭМП СВЧ составляет 15 с, мощность СВЧ-излучения 900 Вт, а пропускная способность установки – 55,95 кг/ч.

4. Урожайность ячменя на опытном поле в период с 2021 по 2024 год после обработки в ЭМП СВЧ превысила контроль (без обработки) на 3,2...6,3 ц/га. Производственные испытания установки для предпосевной обработки зерна в ЭМП СВЧ в хозяйствах Вологодской области показали, что ее применение позволяет снизить уровень зараженности семенного материала с 33–38% до 8–9%, получить всхожесть семенного материала 95%, повысить урожайность на 8,3% в сравнении с традиционной технологией.

5. Проведенная технико-экономическая и энергетическая оценка эффективности работы разработанной установки для предпосевной обработки зерна показала, что дополнительный ежегодный доход составит 372 тыс. руб. при сроке реализации проекта 0,98 года. При сравнении с аналогичной конструкцией «Установка для предпосевной обработки семян СВЧ-энергией» (патент RU 2498551 C1) срок окупаемости капиталовложения составит 2,2 месяца с годовой экономией денежных затрат 274,4 тыс. руб.

Рекомендации производству.

Предложенные конструктивно-технологические параметры и режимы работы установки для СВЧ-обработки зерна могут быть использованы предприятиями, занимающимися разработкой и выпуском машин для предпосевной обработки семян зерновых культур.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Перспективным направлением дальнейшего развития темы является использование СВЧ-обработки для обеззараживания фуражного зерна перед его приготовлением к скармливанию.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ при Минобрнауки России, входящие в категории K1 и K2

1. Белозерова, С. В. СВЧ установка для обработки семян / С. В. Белозерова, П. А. Савиных, Ф. А. Киприянов // Сельский механизатор. – 2021. – №12. – С. 36–37. – 0,6 п.л. (авторских – 0,3 п.л).

2. Белозерова, С. В. Влияние на траекторию движения частицы геометрических и кинематических режимов работы вибрационного транспортера / С. В. Белозерова, П. А. Савиных, А. В. Алешкин, А. Ю. Исупов, Ф. А. Киприянов // Вестник НГИЭИ. – 2022. – №9(136). – С.07–19. – 1,5 п.л. (авторских – 0,5 п.л).

3. Белозерова, С. В. Определение оптимальных параметров установки для обеззараживания зерна при СВЧ обработке / С. В. Белозерова, П. А. Савиных, А. Ю. Исупов // Сельский механизатор. – 2024. – №11. – С.38–39. – 0,7 п.л. (авторских – 0,5 п.л).

4. Белозерова, С. В. Оптимизация работы механической части установки для обработки зерна злаковых культур токами сверхвысокой частоты / С. В. Белозерова, П. А. Савиных, А. Ю. Исупов // Вестник Курганской ГСХА. – 2024. – № 4(52). – С. 51–60. – 1,2 п.л. (авторских – 0,7 п.л).

5. Белозерова, С. В. Влияние СВЧ излучения на патогенную микрофлору семян ячменя / С. В. Белозерова // Сельский механизатор. – 2025. – №1. – С.19–21. – 0,7 п.л. (авторских – 0,7 п.л).

6. Белозерова, С. В. Обоснование конструктивных параметров установки для СВЧ-обработки семян ячменя / С. В. Белозерова // Вестник аграрной науки Дона. – 2025. – Т.18, № 2(70). – 0,8 п.л. (авторских – 0,8 п.л).

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ при Минобрнауки России, входящие в категорию К3

7. Белозерова, С. В. Влияние предпосевной СВЧ-обработки зерна на качественные показатели семенного материала / С. В. Белозерова, П. А. Савиных // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – №4. – С.100–108. – 1 п.л. (авторских – 0,8 п.л).

***Статьи в материалах международных конференций
Статьи, в изданиях, рецензируемых базами Web of Science или Scopus***

8. Belozeroва, S. V. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding / S. V. Belozeroва, F. A. Kipriyanov, Y. A. Plotnikova, P. A. Savinykh, A. Y. Isupov // Journal of Water and Land Development. – 2021. – Т. 49. – № 4–6. – С. 74–78. – 0,6 п.л. (авторских – 0,2 п.л).

9. Belozeroва, S. V. Modeling the trajectory of the movement of grain material on the surface of the vibrating chute / S. V. Belozeroва, A. Y. Isupov, A. V. Aleshkin, P. A. Savinykh // II International Conference “Sustainable Development: Agriculture, Veterinary Medicine and Ecology” (VMAEE-II-2023). – New York. – 2023. – С. 20016. – 0,7 п.л. (авторских – 0,4 п.л).

Патенты на изобретения, авторские свидетельства

10. Патент на изобретение RU 2754444 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Установка для предпосевной СВЧ-обработки семенного зерна / Ф. А. Киприянов, С. В. Белозерова, П. А. Савиных. Вологодская ГМХА. № 2020134936; заявл. 26.10.2020; опубл. 02.09.2021. Бюл. № 25. 6 с.

11. Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2023615207 Российская Федерация. Моделирование траектории движения частицы по наклонной вибрирующей поверхности / С. В. Белозерова, П. А. Савиных, А. Ю. Исупов, А. В. Алешкин. Вологодская ГМХА. № 2023613873. Заявл. 02.03.2023; Опубл. 13.03.2023. Бюл. № 3. 1 с.

Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций

12. Белозерова, С. В. Оценка влияния предпосевной СВЧ обработки на урожайность ячменя в условиях Северо-Запада России / С. В. Белозерова, П. А. Савиных // Место и роль аграрной науки в обеспечении продовольственной безопасности страны: сборник материалов международной научной конференции. – 2022. – С. 23–27. – 0,3 п.л. (авторских – 0,2 п.л).

13. Белозерова, С. В. Воздействие предпосевной обработки семян на урожайность зерновых культур в условиях Северной части Нечерноземья / С. В. Белозерова, П. А. Савиных // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – 2023. – С. 61–63. – 0,3 п.л. (авторских – 0,2 п.л).

14. Белозерова, С. В. Разработка математической модели движения частицы по вибрирующей поверхности транспортера / С. В. Белозерова // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых. – 2023. – С. 259–262. – 0,3 п.л. (авторских – 0,3 п.л).

15. Белозерова, С. В. Исследование конструктивных параметров СВЧ-установки для термообработки зерна / С. В. Белозерова // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 430–434. – 0,3 п.л. (авторских – 0,3 п.л).

16. Белозерова, С. В. СВЧ обеззараживание зерна злаковых культур / С. В. Белозерова // Аграрная наука и инновационное развитие АПК: состояние, проблемы и перспективы: сборник материалов международной научной конференции. – 2024. – С. 18–22. – 0,3 п.л. (авторских – 0,3 п.л).

17. Белозерова, С. В. Оценка эффективности СВЧ-обработки зерновых культур / С. В. Белозерова // Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам : Сборник научных трудов по результатам работы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Вологда, 03 апреля 2025 года. Том 2. – Вологда–Молочное: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2025. – С. 3-5. – 0,3 п.л. (авторских – 0,3 п.л).

