

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.1:631.348.8: 621.318.373

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-57-62



Разработка эффективных устройств обеззараживания зерна на основе анализа биоэлектромагнитных взаимодействий

Александр Иванович Пахомов, д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник

AlivPx@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4403-8399>

Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14

Аннотация. Обеззараживание зерна известными методами на основе электромагнитных излучений сопровождается большими энергозатратами и недостаточно качественной стерилизацией. Лучшими характеристиками обладает метод резонансно-низкочастотного обеззараживания, нуждающийся в эффективной реализации – с учетом цели исследований. Анализ биоэлектромагнитных взаимодействий показал неэффективность соленоида ввиду отсутствия силы Лоренца от магнитной составляющей, слабой и неравномерной электрической составляющей. Во избежание этих недостатков предложены усовершенствованные решения соленоида, оценена возможность применения многополюсных электромагнитов, разработано новое устройство обеззараживания с равномерной электрической составляющей (*E*-полем). Теоретически обоснованы преимущества нового устройства на основе *E*-поля. Проведён эксперимент по обеззараживанию зерна пшеницы на установке производительностью 400 кг/ч с частотой рабочего поля 600 Гц. Для корректной сравнительной оценки эксперимент также проведен на усовершенствованном соленоиде и микроволновой установке Сигма-1. Результаты оценены фитоэкспертизой по стандартной методике. По опытным данным рассчитан коэффициент эффективности обеззараживания, составивший для нового устройства 280, для усовершенствованного соленоида – 16,6, для микроволновой установки «Сигма-1» – 2,3. При этом устройство на основе *E*-поля обеспечило снижение суммарной зараженности материала грибами и бактериями в 3,1 раза, усовершенствованный соленоид – в 1,8 раза. Потребляемая мощность составила соответственно 30 и 410 Вт. Результаты эксперимента подтверждают эффективность нового устройства на основе *E*-поля, отличающегося низкой энергозатратностью, малой металлоёмкостью, простой конструкции и безопасностью в эксплуатации.

Ключевые слова: обеззараживание зерна, электромагнитное излучение, резонансно-низкочастотное обеззараживание, устройство обеззараживания зерна, соленоид, устройство на основе *E*-поля, коэффициент эффективности обеззараживания

Формат цитирования: Пахомов А.И. Разработка эффективных устройств обеззараживания зерна на основе анализа биоэлектромагнитных взаимодействий // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 2. С. 57-62. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-57-62>

© Пахомов А.И., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Developing efficient grain disinfection devices based on the analysis of bioelectromagnetic interactions

Aleksandr A. Pakhomov, DSc (Eng), Associate Professor, Chief Research Associate

AlivPx@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4403-8399>

Agricultural Research Center “Donskoy”; 14, Lenina Str., Zernograd, Rostov region, 347740, Russian Federation

Abstract. The use of commonly used grain disinfection methods based on electromagnetic radiation is accompanied by high energy costs and insufficiently high-quality sterilization. The best characteristics have been demonstrated by a method of resonance-low-frequency disinfection, which needs to be effectively implemented taking into account the purpose of research. The analysis of bioelectromagnetic interactions showed the inefficiency of the solenoid due to the lack of Lorentz strength from the magnetic component and a weak and uneven electrical component. To avoid these shortcomings, the authors proposed improved solutions for the solenoid, evaluated the possibility of using multipolar electromagnets, and developed a new decontamination device with a uniform electrical component (*E*-field). They also provided theoretically described the advantages of a new device based on the *E*-field. An experiment was conducted on the disinfection of wheat grain at a plant with a capacity of 400 kg/h with a working field frequency of 600 Hz. For a correct comparative assessment, the experiment was also conducted on an improved solenoid and a microwave installation Sigma-1. The results were subject to phytoevaluation conducted according to the standard methodology. Based on the experimental data, the authors determined the disinfection

efficiency coefficient, which was 280 for a new device, 16.6 for an advanced solenoid, and 2.3 for the Sigma-1 microwave unit. At the same time, the device based on the E-field provided a reduction in the total contamination of the material with fungi and bacteria in 3.1 times, the improved solenoid – in 1.8 times. Power consumption was 30 and 410 watts, respectively. The experiment results confirm the effectiveness of the new device based on the E-field, which is characterized by low energy consumption, low metal consumption, simple design, and safe operation.

Keywords: grain disinfection, electromagnetic radiation, resonance-low-frequency disinfection, grain disinfection device, solenoid, E-field device, disinfection efficiency coefficient

For citation: Pakhomov A.A. Developing efficient grain disinfection devices based on the analysis of bioelectromagnetic interactions. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(2):57-62 (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-57-62>

Введение. Проблема обеззараживания зерна и семян является одной из наиболее актуальных в АПК. Широкомасштабное применение пестицидов, в том числе 1, 2 классов опасности, создаёт токсикологические последствия для агробиоценоза, человека, животных, а также сопровождается ответной реакцией микромира: резистентностью грибов и бактерий, появлением новых сверхустойчивых штаммов [1]. Указанные последствия носят глобальный характер [1], имеют тенденцию нарастания¹ и едва ли могут быть преодолены в рамках существующих химических технологий. Необходимы иные, «зелёные» методы, ограничивающие или полностью исключающие ядохимикаты, оперирующие, в частности, электромагнитными излучениями (ЭМИ).

Известны сверхвысокочастотный (СВЧ), инфракрасный, ультрафиолетовый и другие методы на основе ЭМИ, однако они несовершенны по качеству стерилизации, энергозатратам и по другим практически значимым показателям [2, 3].

Предыдущими исследованиями установлено, что первопричиной названных недостатков является немонокromaticность спектра ЭМИ [2-4]. При этом на биоматериал действует не одна, а множество электромагнитных волн – гармоник и комбинационных составляющих. Лишь весьма малая их часть приходится на полезные процессы клеточного ингибирования, а основная часть бесполезно поглощается или рассеивается в окружающую среду. В итоге не удаётся добиться высокого соотношения полезного эффекта к затратам [2].

Лучшие результаты демонстрирует метод резонансно-низкочастотного (РНЧ) подавления фитопатогенов, основанный на биофизической модели ингибирования [4, 5]. Согласно этой модели определённые низкие частоты направленно воздействуют на фитопатогены, в клеточных средах которых возбуждаются резонансные колебания гидратированных ионов. Ионы теряют гидратную оболочку, что нарушает их строго селективный транспорт, паталогизирует клеточный метаболизм и вызывает быструю гибель грибов и бактерий. Важно, что указанные явления развиваются лавинообразно, а для их запуска достаточно секундных экспозиций

РНЧ-поля [4, 5], благодаря чему возможна высокопроизводительная поточная обработка с эффективным и энергоэкономным уничтожением фитопатогенов.

Резонансно-низкочастотное обеззараживание может быть эффективно реализовано в технических средствах, когда учитываются особенности взаимодействия электрической и магнитной составляющих рабочего поля с заряженными биоэлементами микробных клеток – гидратированными ионами. При этом выходное устройство должно акцентированно использовать ту составляющую, которая в наибольшей степени возбуждает их резонансный отклик.

Цель исследований: на основе анализа взаимодействия электрической и магнитной составляющих рабочего поля с биоэлементами микробных клеток предложить эффективные устройства поточного обеззараживания зерна и провести их экспериментальную проверку.

Материалы и методы. В качестве материалов исследований использовались накопленные теоретико-экспериментальные данные о разных методах обеззараживания [2-5], биологические сведения о гидратированных ионах и их участии в обменных процессах и метаболизме микробных клеток, модель резонансно-низкочастотного ингибирования [4], общие свойства соленоида и других электромагнитных устройств.

Методика исследований базировалась на физике волн и колебаний, анализе пространственного распределения составляющих электромагнитного поля, теоретических зависимостях сил электромагнитной природы, проработке эффективных технических решений с учётом биоэлектромагнитных взаимодействий, постановке эксперимента на действующих макетах, фитосанитарной экспертизе по госстандартам.

Новизна и актуальность методики обусловлены изучением не учитываемых ранее взаимодействий составляющих рабочего поля с биоэлементами микробных клеток. При этом методика обладает общностью к различным обеззараживающим ЭМИ и даёт частный положительный результат применительно к методу резонансно-низкочастотного обеззараживания зерна.

Результаты и их обсуждение. Общность рассматриваемых явлений заключается в том, что любое электромагнитное поле по Фарадею-Максвеллу состоит из двух составляющих (магнитной и электрической), которые,

¹ Остатки пестицидов в продуктах питания. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food> (дата обращения: 25.10.2022).

являясь свойством пространства и взаимно порождая друг друга, неизбежно присутствуют в любом обеззараживающем устройстве, специфически взаимодействуя с заряженными элементами живых клеток.

Рассмотрим с этих позиций монохроматическое РНЧ-поле, которое согласно биофизической модели [4] выступает в роли внешней периодической силы к возбуждению резонансных осцилляций особых биохимических клеточных элементов: гидратированных ионов K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- и др. Указанные ионы, присутствуя в цитозоле и внеклеточном матриксе микробных клеток, имеют электрический заряд, а значит, подвержены влиянию как магнитной, так и электрической составляющих поля, величина и распределение которых зависят от конструкции устройства.

Распространённым устройством создания электромагнитного поля является соленоид. Пространственное распределение его магнитной и электрической составляющих представлено на рисунке 1, где также показано движение зерновой частицы в вертикальном потоке по вектору \vec{V} .

По вектору \vec{V} также движутся населяющие зерно микроорганизмы и их неотъемлемые элементы – гидратированные ионы. Их перемещение в магнитном поле создаёт условия для возникновения силы Лоренца:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где q – заряд частицы (гидратированного иона); v – скорость частицы; B – модуль вектора магнитной индукции; α – угол между вектором \vec{B} и направлением движения \vec{V} (рис. 1).

Поскольку поток зерна движется вдоль силовых магнитных линий (рис. 1), векторы \vec{B} и \vec{V} коллинеарны, $v = |\vec{V}|$, $\alpha = 180^\circ$ или 0° при противоположном направлении переменного магнитного поля. Тогда из формулы (1) следует, что $\sin \alpha = 0$, $F = 0$.

Таким образом, сила Лоренца по отношению к гидратированным ионам отсутствует, то есть магнитное поле соленоида не производит полезную работу по возбуждению ионных колебаний.

Иначе проявляет себя вихревое электрическое поле. Оно создаёт силу прямого электрического взаимодействия с гидратированными ионами поперечно их движению по вектору \vec{V} . Указанная сила имеет периодический характер, изменяется с частотой РНЧ-поля, что и требуется для возбуждения резонансных ионных осцилляций с амплитудой A (рис. 2). При отсутствии силы Лоренца (от магнитного поля) электрическое поле является единственным продуктивным, но и ему присущи недостатки.

Напряжённость электрического поля соленоида равна [6]

$$E = \pi \cdot r \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (2)$$

где r – радиус действия (рис. 1); μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость сердечника ($\mu = 1$ для воздуха); H – напряжённость магнитного поля.

Из формулы (2) следует, что напряжённость E линейно возрастает от нулевой в центре (при $r = 0$) до наибольшего значения вблизи проводников обмотки, где радиус r максимален по конструкции устройства (рис. 1). Это крайне неблагоприятно для обеззараживания, поскольку в зависимости от положения зерновки в поперечном сечении потока на её микрофлору будет действовать разное E -поле вплоть до нулевого в центре. Как следствие, существенная часть грибов и бактерий сохранит жизнеспособность, то есть качество стерилизации будет невысоким.

Таким образом, обычный соленоид неэффективен для обеззараживания: его магнитное поле не производит полезной работы, а электрическое поле является слабым и неравномерным. Следовательно, нужны иные, более совершенные технические решения.

«Заставить» работать магнитное поле можно, например, в многополюсных электромагнитах на базе статоров асинхронных двигателей [7]. Конструкция этих устройств такова, что векторы \vec{B} и \vec{V} взаимно перпендикулярны, а значит, сила Лоренца действует в полной мере. Однако они гораздо сложнее и дороже соленоида, а также нелинейны по магнитной цепи, что создаёт проблемы монохроматичности рабочего поля.

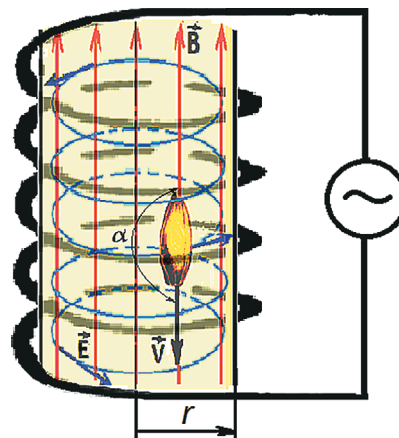


Рис. 1. Векторное распределение магнитного \vec{B} и электрического \vec{E} полей и движение зерновой частицы \vec{V} в соленоиде

Fig. 1. Vector distribution of the magnetic \vec{B} and electric \vec{E} fields and the movement of the grain particle \vec{V} in the solenoid

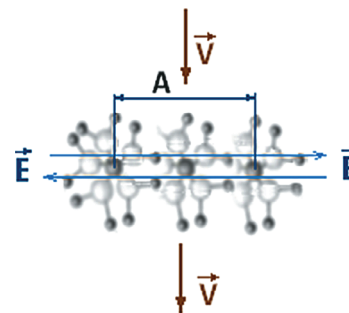


Рис. 2. Осцилляции движущегося гидратированного иона под действием электрической составляющей E

Fig. 2. Oscillations of a moving hydrated ion under the action of an electrical component E

Конструкция обычного соленоида может быть улучшена на основе выполненного анализа. Целесообразно выполнять рабочую камеру устройства не круглого, а кольцевого сечения, заменяя её центральной частью специальной концентрической вставкой из немагнитного материала (рис. 3).

Вставка предотвращает движение потока зерна через центральную (осевую) область соленоида с малым значением E -поля и направляет его в периферийную зону с большей электрической напряженностью по зависимости (2). Тем самым повышаются средняя интенсивность и равномерность активного воздействия, что отчасти нивелирует недостатки соленоида. Дополнительным преимуществом является возможность изменять экспозицию и производительность устройства диаметром центрального стержня и формой направляющих. При винтовой форме направляющих (рис. 3б), кроме того, начинает действовать сила Лоренца, которая в векторной сумме с электрической составляющей способна усилить общее воздействие на гидратированные ионы.

Из формулы (2) следует, что напряжённость E прямо пропорциональна параметрам μ и H . С учётом этого есть возможность усилить электрическое поле соленоида предлагаемым оригинальным решением: изготовлением центрального стержня вставки (рис. 3) из современных магнитодиэлектриков (Kool M μ , MPP, High Flux, XFlux, расплывённое железо). Эти материалы характеризуются малыми потерями на вихревые токи и высокой индукцией насыщения. Их большая магнитная проницаемость μ многократно повышает напряжённость электрического поля в рабочей камере. Увеличивается также индуктивное сопротивление устройства, что снижает ток и энергопотребление. Однако при всех названных преимуществах возможен нежелательный рост гармоник.



Рис. 3. Усовершенствованный соленоид с внутренней концентрической вставкой:

а) с прямыми направляющими; б) с винтовыми направляющими

Fig. 3. Improved solenoid with an internal concentric insert: a) with straight guides; b) with screw guides

Наиболее эффективный путь – акцентированное использование электрической составляющей. Её значительную величину и равномерность можно получить благодаря простому решению (рис. 4).

Как видно из рисунка 4, данное устройство является схожим с электрическим конденсатором, но используется иначе, чем в электротехнике. Поток зерна пропускается через пространство рабочей камеры между пластинами 1 и 2. При подаче на эти пластины синусоидального напряжения в рабочей камере образуется практически однородное монохроматическое E -поле, которое в отличие от соленоида равномерно действует на микрофлору любой зерновки независимо от её положения в потоке. Магнитная составляющая данного устройства незначительна, практической роли не играет и на рисунке 4 не показана.

Действующий макет устройства на основе E -поля представлен на рисунке 5. Устройство имеет загрузочный бункер 3 и рабочую камеру прямоугольного сечения, две противоположные стороны 1, 2 которой – это токопроводящие изолированные медные пластины; две другие стороны выполнены из диэлектрика (рис. 5). На выходе установлен конус 4, замедляющий поток зерна с целью получения требуемой экспозиции и производительности устройства.

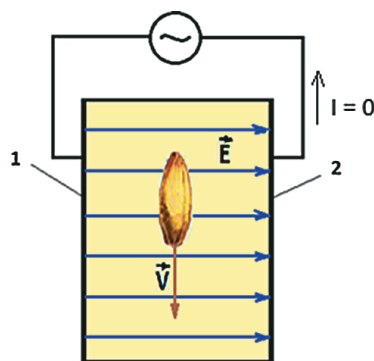


Рис. 4. Принцип работы устройства на основе электрической составляющей (E -поля)

Fig.4. Principle of operation of the device based on electrical component (E -field)

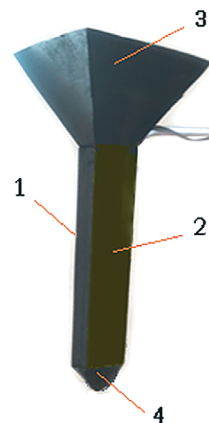


Рис. 5. Устройство на основе E -поля:

1, 2 – токопроводящие пластины; 3 – бункер; 4 – выходной конус

Fig. 5. Device based on E -field:

1, 2 – conductive plates; 3 – hopper; 4 – output cone

Практические измерения показали, что в устройстве на основе Е-поля (рис. 5) напряженность поля $E \geq 2000$ В/м, в то время как в соленоиде $E \leq 0,5$ В/м. Подобная разница, безусловно, должна отразиться на качестве обеззараживания. Чтобы подтвердить это, организован проверочный эксперимент, который представлял собой процесс поточного обеззараживания зерна по методу РНЧ с оценкой результатов стандартной фитоэкспертизой². Параметры опытов были одинаковыми (кроме указанных по напряженности поля): производительность – 400 кг/ч; рабочий материал – зерно озимой пшеницы; частота рабочего поля – 600 Гц; температура – 20°C.

По результатам эксперимента устройство на основе Е-поля обеспечило снижение суммарной зараженности материала грибами и бактериями в 3,1 раза, усовершенствованный соленоид – в 1,8 раза. Потребляемая мощность соответственно составила 30 и 410 Вт. Чрезвычайно низкое энергопотребление устройства на основе Е-поля объясняется отсутствием активного тока и практически нулевым емкостным током между пластинами 1 и 2, то есть с достаточной точностью $I = 0$ (рис. 4). Незначительная мощность (30 Вт) при этом потребляется только электронным оборудованием – генератором и усилителем. В самом же устройстве нет греющих потерь, неизбежных для соленоида, многополюсных электромагнитов и прочих подобных устройств. Его полевой принцип действия гарантирует энергосбережение и ненужность системы охлаждения.

Экспериментальные данные, полученные в ходе опытов, позволили рассчитать коэффициент эффективности обеззараживания по формуле [8]:

$$K_{\text{зо}} = \frac{Q \cdot \Delta Z}{P}, \quad (3)$$

где Q – производительность устройства, т/ч; $\Delta Z = Z_n - Z_k$ – обеззараживающий эффект в процентах, %; Z_n – начальное содержание грибковой и бактериальной микрофлоры в зерне (контроль), %; Z_k – конечное (после обработки) содержание грибковой и бактериальной микрофлоры в зерне, %; P – электрическая мощность, кВт.

Коэффициент эффективности обеззараживания, рассчитанный по формуле (3), имеет следующие значения:

для устройства на основе Е-поля $K_{\text{зо}} = 280$;

для усовершенствованного соленоида $K_{\text{зо}} = 16,6$.

Таким образом, устройство на основе Е-поля превосходит соленоид более чем на порядок по данному показателю. Представляет интерес оценка по нему

² Семена сельскохозяйственных культур. Методы анализа. М.: Стандартинформ, 2011. 246 с.

Список использованных источников

1. Fisher M.C., Hawkins N.J., Sanglard D., Gurr S.J. World-wide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. *Science*. 2018;360 (6390):739-742. <https://doi.org/10.1126/science.aap7999>

и других устройств: например, ранее разработанной СВЧ-установки «Сигма-1», реализующей конвективно-микроволновый принцип обеззараживания [8].

Результаты сравнения трёх устройств представлены на рисунке 6. Как видим, самый низкий показатель $K_{\text{зо}} = 2,25$ присущ установке «Сигма-1», что обусловлено её энергозатратностью (10 кВт). Вместе с тем установка «Сигма-1» превосходит другие по коэффициенту эффективности обеззараживания, являясь лучшей в своем сегменте [8], но значительно уступая новой разработке.

Проведённые исследования демонстрируют качественный скачок в методах и средствах обеззараживания на основе нового устройства с равномерным Е-полем. Оно имеет подавляющее преимущество по коэффициенту эффективности обеззараживания (рис. 6), а также отличается простотой конструкции, компактностью, малой металлоёмкостью и безопасностью в эксплуатации.

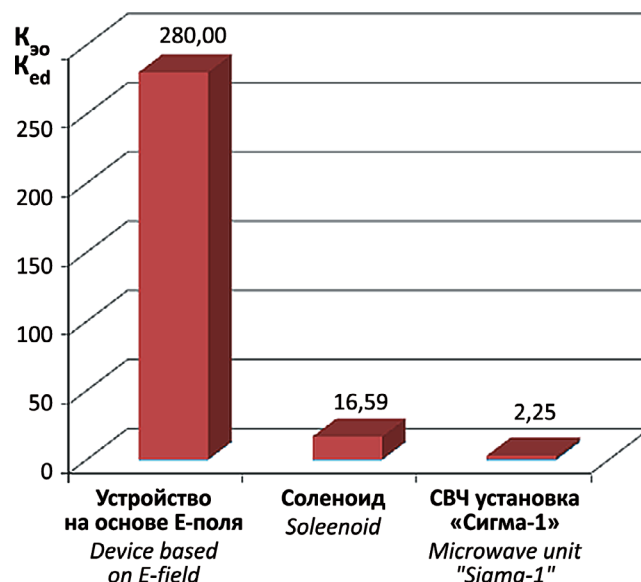


Рис. 6. Коэффициент эффективности обеззараживания разработанных устройств

Fig. 6. Disinfection effectiveness factor of different devices

Выводы

1. В соленоиде как обеззараживающем устройстве отсутствует сила Лоренца от магнитной составляющей, а электрическая составляющая слаба и неравномерна по отношению к биоэлементам микробных клеток.

2. Наиболее совершенным является предлагаемое устройство с равномерным Е-полем, превосходящее более чем на порядок по коэффициенту эффективности обеззараживания усовершенствованный соленоид и СВЧ-установку «Сигма-1».

References

1. Fisher M.C., Hawkins N.J., Sanglard D., Gurr S.J. World-wide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. *Science*. 2018;360(6390):739-742. <https://doi.org/10.1126/science.aap7999>

2. Пахомов А.И. Аналитическая оценка и учёт свойств электромагнитных полей в устройствах агрообеззараживания // Техника и оборудование для села. 2022. № 9. С. 40-44. EDN: KDOETB

3. Пахомов А.И. Биофизика и экспериментальный поиск ингибирующих гармоник магнитообеззараживающего оборудования // Техника и оборудование для села. 2021. № 6 (288). С. 32-35. EDN: WYNMWP.

4. Пахомов А.И. Метод резонансно-низкочастотного обеззараживания зерна: биофизическое обоснование и инновационные преимущества // Техника и оборудование для села. 2022. № 1 (295). С. 30-34. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-30-34>

5. Способ подавления фитопатогенов: Патент RU2781897 C1, МПК A01C1/06 / А.И. Пахомов, В.И. Пахомов. № 2021118919. Заяв. 28.06.21; опубл. 19.10.22, Бюл. № 29. EDN: DEXVTH.

6. Прибор для исследования вихревого электрического поля в магнитной среде: Патент № 2303295 РФ, МПК G09B23/18, G09B23/18 / Р.А. Белокопытов, В.К. Ковнацкий. № 2006113362/09. Заяв. 19.04.2006; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. EDN: SDQTOA.

7. Пахомов А.И. Исходные требования к оборудованию магнитного обеззараживания зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 4. С. 48-54. EDN: UWUHSO.

8. Пахомов А.И. Сравнительный анализ СВЧ-установок для обеззараживания зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 21-26. EDN: YPLOTG.

2. Pakhomov A.I. Analytical assessment and consideration of the properties of electromagnetic fields in agro-disinfection devices. *Machinery and equipment for rural area*. 2022;9:40-44. (In Rus.)

3. Pakhomov A.I. Biophysics and experimental search for inhibiting harmonics of magnetic disinfecting equipment. *Machinery and equipment for rural area* 2021;6:32-35. (In Rus.)

4. Pakhomov A.I. Method of resonant-low-frequency disinfection of grain: biophysical grounds and innovative advantages. *Machinery and equipment for rural area*. 2022;1:30-34. (In Rus.)

5. Pakhomov A.I., Pakhomov V.I. Method for phytopathogen suppression: Patent RU2781897 C1, IPC A01C1/06. No. 2021118919, 2022.

6. Belokopytov R.A., Kovnatskiy V.K. Device for studying the vortex electric field in a magnetic medium: Patent RU2303295, IPC G09B23/18, G09B23/18, 2007.

7. Pakhomov A.I. Initial requirements for magnetic grain disinfection equipment. *Tractors and agricultural machinery*. 2018;4:48-54. (In Rus.)

8. Pakhomov A.I. Comparative analysis of microwave frequency units used for grain disinfection. *Tractors and agricultural machinery*. 2018;1:21-26. (In Rus.)

Статья поступила в редакцию 26.10.2022; поступила после рецензирования и доработки 30.01.2023; принята к публикации 15.03.2023

Received 26.10.2022; revised 30.01.2023; accepted 15.03.2023