

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВЧ-УСТАНОВОК ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЗЕРНА

COMPARATIVE ANALYSIS OF MICROVAVE FREQUENCY DEVICES FOR GRAIN DISINFECTION

А.И. ПАХОМОВ, д.т.н.

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия, AlivPx@mail.ru

A.I. PAKHOMOV, DSc in Engineering

The Federal State Budget Scientific Institution «Agrarian Science
Center «Donskoy», Zernograd, Russia, AlivPx@mail.ru

На сегодняшний день основным методом борьбы с зараженностью зерна и семян в сельском хозяйстве является химическое протравливание. Суть его заключается в нанесении на поверхность семян химически активных веществ, уничтожающих паразитную микрофлору. Однако химический метод стерилизации не лишен серьезных недостатков. Известно, что наиболее эффективные протравители – системные фунгициды – ядовиты, в том числе для человека. Применение подобных веществ помимо токсикологических последствий способствует выработке резистентности паразитных микроорганизмов, их мутациям в сторону чрезвычайно опасных и устойчивых видов. Во избежание этого нужны альтернативные методы и соответствующее оборудование. Обеззараживающим эффектом обладают электрофизические воздействия, в частности сверхвысокочастотная (СВЧ) энергия. При этом механизм подавления паразитной микрофлоры принципиально иной и заключается во влиянии на внутреннюю естественную среду биоорганизмов – биологическую влагу. В этой среде протекают все клеточные процессы живых организмов, поэтому изменение ее параметров, сопровождающееся образованием активных ионов, оказывается критичным для жизнедеятельности паразитных микроорганизмов. Чтобы процесс ионизации вызывал значимый эффект, необходимы определенные характеристики СВЧ-облучения: мощность, длительность, равномерность подвода к материалу, что зависит от применяемого оборудования. В статье сформулированы основные требования к обеззараживающему СВЧ-оборудованию, способному эффективно использоваться в сельском хозяйстве. Рассмотрены наиболее важные параметры существующих СВЧ-установок. Для сравнительной оценки предложен практически удобный критерий – коэффициент эффективности обеззараживания, учитывающий важнейшие характеристики рассматриваемого оборудования в одной цифре. Выполнен расчет вновь введенного коэффициента для ряда СВЧ-установок, и дана его графическая интерпретация. Показано, что инновационная установка «СИГМА-1», разработанная в Аграрном научном центре «Донской», превосходит аналоги по коэффициенту эффективности обеззараживания в 1,5...3 раза. К ее преимуществам также относится возможность дальнейшего совершенствования путем наращивания числа волноводных секций, что кратно увеличивает производительность.

Ключевые слова: стерилизация, электрофизическое обеззараживание, СВЧ-установка, технические характеристики, коэффициент эффективности обеззараживания, волноводная секция.

To date, the main method of combating the contamination of grain and seeds in agriculture is chemical etching. Its essence lies in applying to the surface of seeds chemically active substances that destroy the parasitic microflora. However, the chemical method of sterilization is not without serious shortcomings. It is known that the most effective disinfectants – systemic fungicides – are poisonous, including for humans. The use of such substances in addition to toxicological effects contributes to the development of resistance of parasitic microorganisms, their mutations in the direction of extremely dangerous and resistant species. To avoid this, alternative methods and equipment are needed. Electrophysical effects, in particular, microwave frequency energy. At the same time, the mechanism for suppressing the parasitic microflora is fundamentally different and consists in the influence of biological organisms on the internal natural environment of biological organisms. In this environment, all the cellular processes of living organisms occur, therefore, changing its parameters, accompanied by the formation of active ions, is critical for the vital activity of parasitic microorganisms. For the ionization process to produce a significant effect, certain characteristics of microwave radiation are needed: power, duration, uniformity of supply to the material, which depends on the equipment used. The article formulates the basic requirements for decontaminating microwave equipment that can be effectively used in agriculture. The most important parameters of existing microwave devices are considered. For comparative evaluation, an almost convenient criterion is proposed – the decontamination efficiency factor, which takes into account the most important characteristics of the equipment in question in one digit. The calculation of the newly introduced coefficient for a number of microwave devices has been performed and its graphical interpretation is given. It is shown that the innovative installation SIGMA-1, developed at the Agrarian Science Center Donskoy, surpasses the analogues in terms of the decontamination efficiency factor of 1.5...3 times. Its advantages also include the possibility of further improvement by increasing the number of waveguide sections, which multiplies the productivity.

Keywords: sterilization, electrophysical disinfection, microwave device, technical characteristics, efficiency factor of decontamination, waveguide section.

Введение

В современной агротехнике возделывания зерновых культур основным приемом борьбы с фитопатогенными инфекциями является предпосевное протравливание. Нанесение на поверхность семян химически активных веществ обеспечивает высокий уровень подавления патогенной микрофлоры, однако сам принцип химической обработки не лишен серьезных недостатков. Так, наиболее эффективные протравители – системные фунгициды из класса бензимидазолов (фундазол, фундазим СП и др.) – относятся ко второму классу опасности, то есть ядовиты, в том числе, для человека. Это чревато токсикологическими последствиями для окружающей среды и человека, в то время как паразитные микроорганизмы вырабатывают резистентность к применяемым ядохимикатам и подвергаются мутациям под их действием в сторону чрезвычайно опасных и устойчивых видов.

Указанных недостатков лишено электрофизическое обеззараживание, использующее сверхвысокочастотную (СВЧ) энергию. Механизм электрофизической стерилизации принципиально отличается от химического. Он не требует внесения в материал инородных опасных веществ, а основан на преобразовании внутренней естественной среды биоорганизмов – биологической влаги. При достаточном уровне внешней энергии влага живых организмов ионизируется с изменением таких столь важных параметров, как водородный показатель pH и окислительно-восстановительный потенциал (ОВП). В результате действия активных ионов в клетках паразитных микроорганизмов развивается окислительный стресс, происходит разрыв пептидных связей в длинных белковых цепях, нарушается синтез АТФ, наблюдаются другие биологические явления, вызывающие в конечном итоге гибель грибов и бактерий, населяющих зерно, без применения ядохимикатов [1].

При отмеченных преимуществах СВЧ-обработка имеет свои недостатки. К ним относятся меньший стерилизующий эффект по сравнению с химическим протравливанием и значительные затраты электроэнергии. Лучшие результаты могут дать комбинированные методы [2], но и для них актуально снижение энергозатрат и увеличение обеззараживающего эффекта на этапе СВЧ-воздействия. При этом немаловажно, чтобы этот эффект наблюдался на участке высокой производительности установки, обеспечивая тем самым возможность встраивания данной элек-

тротехнологии в конкретные производственные процессы АПК при согласованной работе всей технологической линии.

Переходя к оценке СВЧ-оборудования, следует отметить его существенные отличия в части генерации микроволновой энергии, ее подвода к материалу, организации движения потока материала через активную зону, наличия или отсутствия систем рекуперации тепла. Все это приводит к разным техническим характеристикам, которые подлежат анализу. Особого внимания при этом, разумеется, заслуживают наиболее важные параметры: производительность, обеззараживающий эффект и установленная мощность, характеризующая энергопотребление.

Цель исследования

Цель исследования – анализ характеристик СВЧ-оборудования для обеззараживания зерна, выработка единого критерия для его объективной оценки, проведение сравнения СВЧ-установок по вновь введенному критерию.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Технические характеристики СВЧ-оборудования в той или иной мере освещаются производителями и могут служить материалом для анализа. Исходной базой для начального анализа служит соответствие электроустановки некоторым общим требованиям, которые происходят из назначения подобного оборудования, условий его работы в АПК, качества выходной продукции. К таким требованиям относятся:

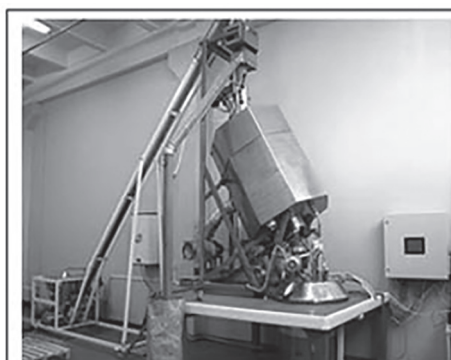
- производительность – от 1 т/ч и выше;
- качество обеззараживания – уменьшение суммарного содержания грибковой и бактериальной микрофлоры в зерне – не менее чем на 25 %;
- энергоэкономия – до 30 % за счет рекуперации тепла;
- среда эксплуатации – сельскохозяйственные помещения с относительной влажностью 70...90 %, температурой от +10 до +30 °C и запыленностью до 1,3 г/м³ [3];
- безопасность – минимальный уровень внешнего излучения, не превышающий допустимых норм.

На практике полная техническая информация о той или иной СВЧ-установке чаще всего отсутствует. Это вынуждает оперировать ограниченными данными, используя, в частности, производительность и установленную мощность, как правило, известные (рис. 1–6).



СВЧ-установка «МАГРА-Э»
(«Магратеп», Фрязино)
Производительность - до 400 кг/ч;
Установленная мощность - 6 кВт

Рис. 1. СВЧ-установка «МАГРА-Э»



СВЧ-установка «ПОТОК»
(«Синергис», Санкт-Петербург)
Производительность - до 500 кг/ч;
Установленная мощность - 14 кВт;

Рис. 2. СВЧ-установка «ПОТОК»



Микроволновая установка «БАРХАН-3»
(«Ингредиент», Санкт-Петербург)
Производительность - до 200 кг/ч;
Установленная мощность - 42 кВт;
Масса - 0,6 т

Рис. 3. СВЧ-установка «БАРХАН-3»



Микроволновая установка «ЛАМИНАРИЯ»
(«Ингредиент», Санкт-Петербург)
Производительность - до 600 кг/ч;
Установленная мощность - 25 кВт;
Масса - 0,65 т

Рис. 4. СВЧ-установка «ЛАМИНАРИЯ»



Микроволновая установка «АРАБИС»
(«Ингредиент», Санкт-Петербург)
Производительность - до 500 кг/ч;
Установленная мощность - 16,8 кВт;
Масса - 0,5 т

Рис. 5. СВЧ-установка «АРАБИС»



СВЧ-установка «СИГМА-1»
(ФГБНУ СКНИИМЭСХ, Зерноград)
Производительность - до 900 кг/ч;
Установленная мощность - 10 кВт

Рис. 6. СВЧ-установка «СИГМА-1»

Фрязинское предприятие «НПП «Магратеп» разработало обеззараживающую СВЧ-установку «МАГРА-Э» [4], имеющую блочно-модульное построение (рис. 1). Ее производительность составляет 400 кг/ч, что не удовлетворяет рассмотренным выше требованиям и является ограничивающим фактором для применения в АПК.

Ряд СВЧ-установок выпускается в Санкт-Петербурге [5]. Их внешний вид и характеристики представлены на рис. 2–5.

На рис. 6 показан внешний вид и характеристики новой СВЧ-установки, получившей название «СИГМА-1», которая разработана в лаборатории биоэнерготехнологий подразделения СКНИИМЭСХ ФГБНУ «Аграрного научного центра «Донской».

Данные на рис. 1–6 свидетельствуют, что все рассматриваемые СВЧ-установки имеют производительность ниже требуемой, при том что их установленная мощность достигает десятков кВт. Предпочтительной на этом фоне выглядит установка «СИГМА-1», имеющая производительность 900 кг/ч при установленной мощности 10 кВт. Данная установка реализует комбинированный конвективно-микроволновый метод обеззараживания, за счет чего получен значительный обеззараживающий эффект 25 %. Энергоэкономия обеспечивается использованием вторичного тепла от системы охлаждения магнетронов [6].

Инновационные технические решения установки «СИГМА-1» включают: многоканальный СВЧ-энергоподвод; расширенную зону СВЧ-облучения на восьми магнетронах; специальный корпус-воздуховод-защитный экран; загрузочный бункер с функцией формирования тонкого слоя зерна и др. Установка имеет повышенную надежность благодаря многоканальному построению [6] и эффективной системе охлаждения, одновременно выполняющей функции нагнетания теплоносителя в зону конвективного нагрева [7, 8].

С целью дальнейшего анализа наиболее важные параметры СВЧ-установок целесообразно объединить в единый показатель – коэффициент эффективности обеззараживания, рассчитываемый по формуле:

$$K_{\text{зо}} = \frac{Q \frac{\Delta Z}{100}}{P_y}, \quad (1)$$

где $K_{\text{зо}}$ – коэффициент эффективности обеззараживания; Q – производительность СВЧ-

установки, кг/ч; P_y – установленная электрическая мощность, кВт; ΔZ – обеззараживающий эффект в процентах:

$$\Delta Z = Z_n - Z_k,$$

где Z_n – начальное (до обработки) суммарное содержание грибковой и бактериальной микрофлоры в зерне, %; Z_k – конечное (после обработки) суммарное содержание грибковой и бактериальной микрофлоры в зерне, %.

Согласно выражению (1), коэффициент $K_{\text{зо}}$ тем выше, чем больше производительность установки, выше обеззараживающий эффект и ниже установленная мощность. Таким образом, он однозначно характеризует СВЧ-установку по важнейшим характеристикам, а рассчитанный для ряда установок дает возможность их объективного сравнения.

К сожалению, не все производители СВЧ-оборудования указывают обеззараживающий эффект ΔZ (он известен только для установки «СИГМА-1»), а также производительность, при которой он был получен. Это затрудняет полностью корректный анализ по вновь введенному показателю $K_{\text{зо}}$. Для приближенного анализа введем коэффициент:

$$K_{\text{зо}}^* = Q / P_y.$$

Данные для расчета коэффициента $K_{\text{зо}}^*$ имеются и приведены на рис. 1–6. Принимая их во внимание, произведен расчет в программе Ms Excel. Результаты расчета в графическом виде представлены на рис. 7.

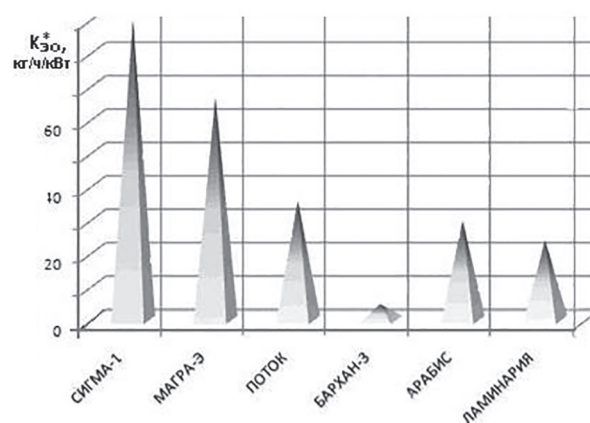


Рис. 7. Коэффициент эффективности обеззараживания

Очевидно, что наибольший коэффициент $K_{\text{зо}}^*$ имеет установка «СИГМА-1», для которой $K_{\text{зо}}^* = 90$ кг/ч/кВт. Это означает, что данная установка способна обеззараживать 90 кг мате-

риала в 1 час на 1 кВт установленной мощности. На втором месте установка «МАГРА-Э», уступающая установке «СИГМА-1» в 1,5 раза по анализируемому показателю. Остальные СВЧ-установки имеют в три и более раз худший коэффициент эффективности обеззараживания, т.е. они малопродуктивны и энергозатратны.

Следует заметить, что благодаря тепловому эффекту микроволн практически все СВЧ-установки могут использоваться для сушки, а в отдельных случаях и для жарки материала, как, например, установка «БАРХАН-3». Естественно, что в режиме жарки производительность мала, а затраты электроэнергии велики, чем объясняется крайне низкий коэффициент указанной установки. Функция обеззараживания при этом также присутствует, но чтобы достичь уровня установки «СИГМА-1», производительность установки «БАРХАН-3» в режиме обеззараживания должна быть увеличена почти в 20 раз, что крайне маловероятно. Иначе говоря, не имея упомянутых инновационных решений, установка «БАРХАН-3», не сможет превзойти установку «СИГМА-1» по коэффициенту эффективности обеззараживания, несмотря на в четыре раза большую установленную мощность.

К особенностям установки «СИГМА-1» относится модульный принцип построения, согласно которому в ее основе лежит независимый модуль – волноводная секция. Секция представляет собой запатентованное СВЧ-устройство на 4 магнетронах, расположенных особым образом на общей камере-трубопроводе [8]. В оригинальной установке две таких секции, однако их количество может быть увеличено путем последовательного и параллельного соединения.

На рис. 8 показано комбинированное параллельно-последовательное соединение четырех волноводных секций, что в сравнении с установкой «СИГМА-1» обеспечивает повышение производительности в 2 раза. При 8 секциях производительность увеличивается в 4 раза и т.д. Немаловажно, что при предлагаемом способе соединения секций габаритная высота установки не увеличивается – она сохраняет компактность. Используя разное количество секций, перспективно создание обеззараживающего СВЧ-оборудования разной производительности, ориентированного на конкретного потребителя, – от малых фермерских хозяйств до крупных растениеводческих комплексов.

Выводы

1. СВЧ-установки для обеззараживания зерна должны удовлетворять определенным требованиям, важнейшими среди которых являются производительность, обеззараживающий эффект и энергозатраты. Предложен интегральный критерий – коэффициент эффективности обеззараживания, объединяющий эти параметры в одной цифре и рассчитываемый по предлагаемой методике.

2. Расчет и графическое представление коэффициента эффективности обеззараживания $K_{\text{эо}}^*$ для ряда СВЧ-установок демонстрирует явные преимущества установки «СИГМА-1», превосходящей аналоги в 1,5...3 раза. Возможно дальнейшее совершенствование подобного оборудования путем наращивания числа волноводных секций, что кратно увеличивает производительность.

Литература

1. Пахомов А.И. Теоретические предпосылки совершенствования процесса электрофизического обеззараживания зерна // Хранение и переработка зерна. 2017. № 7 (215). С. 49–52.
2. Фисинин В.И., Лачуга Ю.Ф., Пахомов В.И., Пахомов А.И., Буханцов К.Н. Способ комбинированного обеззараживания зерна и семян с использованием электромагнитного поля сверхвысокой

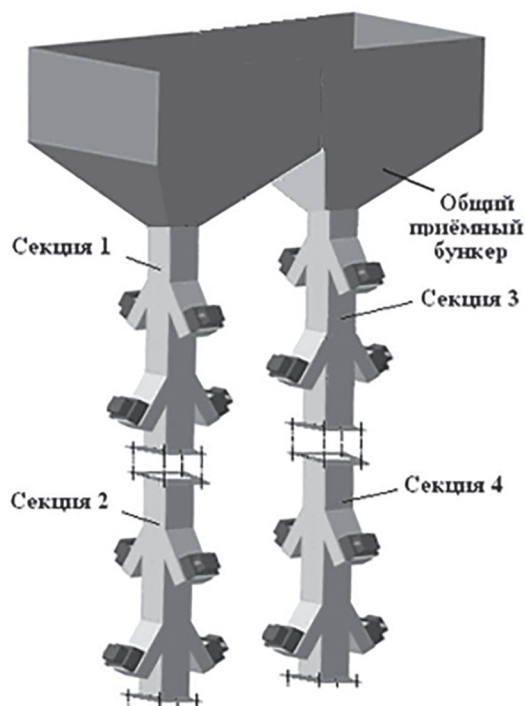


Рис. 8. Параллельно-последовательное соединение волноводных секций СВЧ-установки

частоты: патент на изобретение № 2550479, Российская Федерация. Опубликовано 10.05.2015. Бюл. № 13.

3. Поспелов Г.Е., Русан В.И. Надежность электроустановок сельскохозяйственного назначения. Минск: Урожай, 1982. 166 с.
4. Морозов О.А., Воскобойник М.Ф., Каргин А.Н., Воробьев И.Г., Пахомов В.И. Устройство для электромагнитной обработки сыпучих диэлектрических материалов: патент на изобретение № 2382529, Российская Федерация. Опубликовано 20.02.2010. Бюл. № 5.
5. Бастрон А.В., Заплетина А.В., Логачев А.В. Обзор СВЧ-установок для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур // Вестник КрасГАУ. 2015. № 5. С. 63–68.
6. Пахомов А.И., Парапонов А.А. Повышение надежности СВЧ-источника // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011. № 8. С. 29.
7. Пахомов А.И., Максименко В.А. Инновационная СВЧ-установка «СИГМА-1» // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 5. С. 11–12.
8. Пахомов А.И., Пахомов В.И., Максименко В.А. Устройство для непрерывной СВЧ-обработки сыпучих сельскохозяйственных материалов: патент на полезную модель № 134726, Российская Федерация. Опубликовано 20.11.2013. Бюл. № 32.

References

1. Pakhomov A.I. Theoretical prerequisites for improving the process of electrophysical grain disinfection. *Khranenie i pererabotka zerna*. 2017. No 7 (215), pp. 49–52 (in Russ.).
2. Fisnin V.I., Lachuga Yu.F., Pakhomov V.I., Pakhomov A.I., Bukhantsov K.N. *Sposob kom-*

binirovannogo obezzarazhivaniya zerna i semyan s ispol'zovaniem elektromagnitnogo polya sverkh-vysokoy chastoty [A method for combined disinfection of grain and seeds using an ultrahigh-frequency electromagnetic field]: patent na izobretenie, No 2550479, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 10.05.2015. Byul. No 13.

3. Pospelov G.E., Rusan V.I. *Nadezhnost' elektroustanovok sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Reliability of electrical installations for agricultural purposes]. Minsk: Urozhay Publ., 1982. 166 p.
4. Morozov O.A., Voskoboynik M.F., Kargin A.N., Vorob'ev I.G., Pakhomov V.I. *Ustroystvo dlya elektromagnitnoy obrabotki syuchikh dielektricheskikh materialov* [Device for electromagnetic processing of bulk dielectric materials]: patent na izobretenie, No 2382529, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 20.02.2010. Byul. No 5.
5. Bastron A.V., Zapletina A.V., Logachev A.V. Overview of microwave devices for presowing processing of seeds of crops. *Vestnik KrasGAU*. 2015. No 5, pp. 63–68 (in Russ.).
6. Pakhomov A.I., Paraponov A.A. Increasing the reliability of the microwave source. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011. No 8, p. 29 (in Russ.).
7. Pakhomov A.I., Maksimenko V.A. Innovative microwave installation «SIGMA-1». *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 5, pp. 11–12 (in Russ.).
8. Pakhomov A.I., Pakhomov V.I., Maksimenko V.A. *Ustroystvo dlya nepreryvnoy SVCh-obrabotki syuchikh sel'skokhozyaystvennykh materialov* [Device for continuous microwave processing of bulk agricultural materials]: patent na poleznuyu model', No 134726, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 20.11.2013. Byul. No 32.