

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН

ЦЗЮНЬЯНЬ ЛУ (LYU JUNYAN), С. В. КУРЗЕНКОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: sergkrz@yandex.by

(Поступила в редакцию 08.01.2026)

*В современных условиях развитие растениеводства во многом определяется совершенствованием предпосевной обработки семян, направленной на активацию их физиологической активности и повышение устойчивости к стрессовым воздействиям внешней среды. Среди инновационных физических методов особый интерес представляет микроволновая обработка, основанная на взаимодействии электромагнитного излучения с биологическим материалом. Эта технология характеризуется рядом преимуществ, включая высокую скорость воздействия, глубокое проникновение энергии в семенной материал, а также сочетание тепловых и нетепловых эффектов, что способствует ускорению процессов прорастания и последующему улучшению роста и развития сельскохозяйственных культур.*

*В представленной работе рассмотрена проблема неравномерного распределения энергии в микроволновых установках для предпосевной обработки семян, обусловленная образованием стоячих электромагнитных волн в резонаторных камерах. Проанализированы методы повышения однородности поля: применение многомодовых камер, использование динамических систем перемещения материала и микроволновых мешалок, а также технологии численного моделирования. Показано, что наибольший эффект достигается при комплексном сочетании данных подходов. Сделан вывод о необходимости их интеграции в промышленные установки для обеспечения равномерного, контролируемого и воспроизводимого воздействия на семенной материал. Приведен сравнительный анализ методов и даны практические рекомендации по их применению для разработки современного высокоэффективного оборудования.*

*Перспективы исследований связаны с развитием интеллектуальных систем адаптивного управления и использованием новых конструкционных материалов.*

*Полученные выводы могут быть полезны специалистам в области семеноводства, агроинженерии, технологий хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, а также использоваться при разработке инновационных проектов в сфере продовольственной безопасности и устойчивого развития аграрного производства.*

**Ключевые слова:** микроволновая обработка семян, предпосевная подготовка, стоячие электромагнитные волны, резонансные камеры, многомодовые резонаторы, динамические системы выравнивания поля, численное моделирование.

*In modern conditions, the development of plant cultivation is largely determined by the improvement of pre-sowing seed treatment aimed at activating their physiological activity and increasing their resistance to environmental stress. Among innovative physical methods, microwave treatment, based on the interaction of electromagnetic radiation with biological material, is of particular interest. This technology is characterized by a number of advantages, including high speed of action, deep energy penetration into the seed, and a combination of thermal and non-thermal effects, which contributes to accelerated germination and subsequent improvement in the growth and development of agricultural crops.*

*This paper examines the problem of uneven energy distribution in microwave pre-sowing seed treatment units caused by the formation of standing electromagnetic waves in the resonator chambers. Methods for improving field uniformity are analyzed, including the use of multimode chambers, dynamic material handling systems, and microwave mixers, as well as numerical simulation technologies. It is demonstrated that the greatest effect is achieved with a comprehensive combination of these approaches. A conclusion is drawn regarding the need for their integration into industrial installations to ensure uniform, controlled, and reproducible effects on seed material. A comparative analysis of the methods is presented, and practical recommendations for their application in the development of modern, highly efficient equipment are provided.*

*Prospects for this research are related to the development of intelligent adaptive control systems and the use of new structural materials.*

*The findings may be useful to specialists in seed production, agricultural engineering, and agricultural storage and processing technologies, as well as for the development of innovative projects in food security and sustainable agricultural production.*

**Key words:** microwave seed treatment, pre-sowing preparation, standing electromagnetic waves, resonant chambers, multimode resonators, dynamic field leveling systems, numerical simulation.

### Введение

В современных условиях развитие растениеводства во многом определяется совершенствованием предпосевной обработки семян, направленной на активацию их физиологической активности и повышение устойчивости к стрессовым воздействиям внешней среды. Среди инновационных физических методов особый интерес представляет микроволновая обработка, основанная на взаимодействии электромагнитного излучения с биологическим материалом. Эта технология характеризуется рядом преимуществ, включая высокую скорость воздействия, глубокое проникновение энергии в семенной материал, а также сочетание тепловых и нетепловых эффектов, что способствует ускорению процессов прорастания и последующему улучшению роста и развития сельскохозяйственных культур [1].

Однако широкое внедрение этой технологии в агропромышленный комплекс сдерживается рядом технических проблем, ключевой из которых является недостаточная однородность распределения энергии в рабочем объеме обрабатываемого семенного материала. Неравномерность распределения электромагнитного поля приводит к формированию локальных зон с избыточной и недостаточной плотностью мощности, что, в свою очередь, вызывает перегрев и повреждение части семян при одно-временной недополучении необходимой дозы воздействия другой их частью [2]. Следствием этого становится нестабильность и непредсказуемость конечных результатов микроволновой обработки семян, что существенно снижает доверие к этой технологии со стороны производителей.

Целью представленных материалов и исследований является анализ и обоснование подходов к повышению однородности микроволнового поля в установках для обработки семян, выявление их преимуществ и ограничений, а также определение оптимальных стратегий и рекомендаций по проектированию оборудования, обеспечивающего равномерное и воспроизводимое воздействие на семенной материал.

### **Основная часть**

Физической основой проблемы неоднородности распределения энергии в рабочем объеме обрабатываемого материала является явление образования стоячих электромагнитных волн в замкнутых резонансных системах, характерное для стандартных микроволновых камер [3].

В связи с этим актуальной научно-технической задачей становится разработка и анализ эффективных методов и конструктивных решений, направленных на выравнивание пространственного распределения микроволновой энергии. К таким методам традиционно относят использование многомодовых резонаторов сложной геометрии, применение динамических систем, таких как мешалки поля и ротационные камеры, а также активное внедрение технологий моделирования для более точного прогнозирования и оптимизации параметров поля на этапе проектирования оборудования [4].

Образование стоячих электромагнитных волн в замкнутых металлических резонаторных камерах возникает при интерференции, падающей и отраженной от стенок камеры волн, имеющих одинаковую частоту амплитуду и фазу. В результате их сложения в объеме камеры формируется стационарная волновая картина с четко выраженными областями максимумов и минимумов амплитуды поля, известными как точки пучности (или «горячие точки») и узловые точки (или «холодные точки»). В точках пучности амплитуда колебаний вектора напряженности электрического поля достигает наибольшего значения, что соответствует зонам интенсивного поглощения энергии и локального перегрева, так называемым «горячим точкам». Напротив, в узловых точках амплитуда поля близка к нулю, и поглощение энергии материалом оказывается минимальным, образуя «холодные зоны» [5]. По факту данного эффекта наблюдается следующее явление, когда излучаемая амплитуда электромагнитной волны колеблется во времени, однако распределение «горячих» и «холодных» точек остается неизменным. Это и создает впечатление «стоячей» волны.

Данная пространственная неоднородность является принципиальной особенностью резонансных систем и особенно ярко выражена в простых одномодовых камерах, рассчитанных на возбуждение одной доминирующей моды [6]. Проблема усугубляется тем, что распределение этих узлов и пучностей жестко фиксировано геометрией камеры и частотой излучения, а наличие диэлектрического материала, коим являются семена, еще больше искажает исходную структуру поля вследствие отражений и преломлений на границах раздела сред.

Таким образом, неравномерность является не случайным фактором, а прямым следствием волновой природы микроволнового излучения и конструктивных особенностей стандартного оборудования, что требует целенаправленного вмешательства в процесс распространения волн для обеспечения равномерного воздействия на обрабатываемый семенной материал.

Одним из наиболее эффективных подходов преодоления такой неравномерности является использование многомодовых резонансных камер. В отличие от одномодовых, такие камеры проектируются таким образом, чтобы их размеры значительно превышали длину волны, что позволяет одновременно возбуждать большое количество различных резонансных мод – независимых конфигураций электрического и магнитного полей. При суперпозиции этих мод происходит статистическое усреднение поля, в результате чего пиковые значения напряженности в пучностях одних мод компенсируются минимумами других, что в целом приводит к значительному выравниванию распределения энергии по объему камеры [7]. Для дальнейшего усиления этого эффекта применяются камеры со специальной геометрией, например, эллиптической или неправильной формы, которые препятствуют формированию упорядоченных стоячих волн.

Другим широко распространенным методом является динамическое изменение конфигурации поля в процессе обработки. Это достигается за счет механических систем, таких как вращающийся стол или платформа для размещения семян, которые обеспечивают их перемещение через различные зоны камеры, или с помощью микроволновых мешалок – отражающих лопастей, вращающихся внутри волновода и постоянно изменяющих режим распространения энергии в камере [8]. Принцип действия этих систем заключается в том, чтобы со временем усреднить воздействие на каждый элемент обрабатываемого материала, подвергая его воздействию как интенсивных, так и слабых зон поля. Существенную роль в современном проектировании играют технологии численного моделирования, которые позволяют априорно, на этапе компьютерного проектирования, рассчитать распределение поля для конкретной геометрии камеры и свойств материала, оптимизировать расположение источников излучения и внести необходимые конструктивные изменения до создания физического прототипа [9].

Комбинирование этих методов (а именно многомодового подхода, динамического перемешивания и предварительного математического моделирования) представляет собой наиболее перспективный путь для создания промышленного оборудования, обеспечивающего стабильно высокое качество и однородность микроволновой обработки семян.

Сравнительная оценка рассмотренных методов повышения однородности поля позволяет выделить их ключевые преимущества, ограничения и области наиболее эффективного применения. Использование многомодовых камер является фундаментальным конструктивным решением, позволяющим за счет суперпозиции большого числа резонансных мод статистически выровнять распределение энергии [10]. Этот метод отличается высокой надежностью и долговечностью, так как не содержит подвижных элементов, но требует тщательного проектирования и точного изготовления, что может повысить первоначальную стоимость оборудования. Его эффективность наиболее высока для обработки значительных объемов сыпучих материалов, где требуется создание усредненного поля в большом объеме.

Динамические методы, такие как вращающиеся столы и микроволновые мешалки, обеспечивают высокую степень выравнивания за счет принудительного изменения конфигурации поля или положения продукта во времени [11]. Они особенно эффективны для обработки штучных изделий или небольших партий семян, где необходимо гарантировать, что каждая единица продукта получит идентичную дозу воздействия.

К недостаткам этих систем можно отнести наличие движущихся частей, что потенциально снижает надежность и требует дополнительных мер по обслуживанию, а также приводит к усложнению конструкции камеры [12].

Технология численного моделирования не является самостоятельным методом выравнивания, но служит мощным инструментом для оптимизации резонаторных камер и механических систем динамического изменения конфигурации поля в процессе обработки [13]. Она позволяет точно рассчитывать и оптимизировать распределение напряженности поля внутри камеры, что способствует более точному пониманию распределения энергии оборудования для микроволновой обработки при стимуляции семян. С помощью технологии численного моделирования можно прогнозировать и оптимизировать однородность распределения энергии оборудования в различных условиях, обеспечивая тем самым надежную теоретическую поддержку и техническое руководство для практического применения. Это позволит значительно сократить время и стоимость разработки, обеспечивая предсказуемость результатов, однако требует значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации инженеров.

### **Заключение**

Таким образом, выбор оптимальной стратегии совершенствования оборудования для микроволновой обработки семян сельскохозяйственных культур зависит от конкретно поставленных задач. Для лабораторных исследований, подразумевающих обработку малых партий семенного материала целесообразно комбинировать компактную многомодовую камеру с системой вращения его порции. Для создания промышленных установок непрерывного или полунепрерывного действия рекомендуется применять многомодовые камеры больших размеров, оснащенные мешалками и системами перемещения материала, при этом проект должен в обязательном порядке включать этап компьютерного моделирования для верификации распределения поля и минимизации рисков при создании опытного образца [14].

Следовательно, проведенный анализ позволяет заключить, что проблема неравномерности распределения микроволновой энергии в установках для обработки семян имеет системное решение,

основанное на комбинации конструктивных и технологических подходов. Наиболее эффективным путем является не поиск единственного универсального метода, а их синергетическое сочетание, при котором многомодовый дизайн резонаторной камеры создает базовую предпосылку для выравнивания поля, а динамические системы доводят этот показатель до требуемого уровня за счет временного усреднения. Критически важным элементом современного проектирования становится использование численного моделирования, которое переводит процесс создания оборудования из области эмпирических поисков в плоскость целенаправленной инженерной оптимизации. Реализация таких комплексных решений позволяет создавать оборудование, обеспечивающее контролируемое, воспроизводимое и равномерное воздействие на семенной материал, что является ключевым условием для широкого внедрения микроволновой технологии в сельскохозяйственную практику.

Перспективы дальнейших исследований видятся в развитии интеллектуальных систем адаптивного управления, способных в реальном времени отслеживать состояние обрабатываемого материала, например, с помощью спектрального анализа или диэлектрической спектроскопии, и динамически подстраивать параметры излучения для компенсации возникающих неоднородностей. Кроме того, актуальной задачей является интеграция модулей мониторинга нетепловых эффектов, что позволит оптимизировать процесс не только по тепловому, но и по биостимулирующему воздействию. Исследование новых материалов для покрытий внутренних поверхностей камер, способных рассеивать энергию, также открывает дополнительные возможности для улучшения однородности поля. Развитие в этих направлениях будет способствовать созданию следующего поколения энергоэффективного и высокоточного агротехнического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология предпосевной обработки семян рапса на основе использования микроволновой энергии / Войнов Г. М. [и др.] // Научные принципы регулирования развития АПК: предложения и механизмы реализации. – 2022. – С. 255–262.
2. Будников, Д. А. Исследование характера распределения и электромагнитного поля в поле действия экспериментальной свч-вентиляционной установки для построения систем тепловой обработки зерна / Д. А. Будников // Агротехника и энергообеспечение. – 2021. – №. 1 (30). – С. 44–51.
3. Обработка семян в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / С. Н. Борычев [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – №. 2 (66). – С. 339–347.
4. Курзенков, С. В. Анализ физико-технических основ микроволновой активации семенного материала сельскохозяйственных культур / С. В. Курзенков, Л. Цзюньянь // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – №. 3. – С. 80–84.
5. Li C. et al. Microwave traveling-standing wave method for density-independent detection of grain moisture content // Measurement. – 2022. – Т. 198. – С. 111373.
6. Suzuki N. et al. Microwave pre-stimulation methodology for plant growth promotion // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 13903.
7. Boshkova I. et al. Testing a microwave device for the treatment of plant materials by various technologies // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Т. 2. – №. 5. – С. 104.
8. Курзенков, С. В. Направления научного сотрудничества Беларуси и Китая в области развития и совершенствования национальных аграрных отраслей / С. В. Курзенков, Ч. Сяньлэй, Л. Цзюньянь // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства. – 2025. – С. 134–138.
9. Wu J. et al. Compact Microwave Continuous-Flow Heater // Processes. – 2024. – Т. 12. – №. 9. – С. 1895.
10. Современные физические методы и технологии в сельском хозяйстве / С. В. Гудков [и др.] // Успехи физических наук. – 2024. – Т. 194. – №. 2. – С. 208–226.
11. Fu H. et al. Rotational energy harvesting for self-powered sensing // Joule. – 2021. – Т. 5. – №. 5. – С. 1074–1118.
12. Richter A., Fišer P. Reliability Analysis of Rotary Table Over // Advances in Mechanism Design III: Proceedings of TMM 2020. – 2021. – Т. 85. – С. 269.
13. Qin J. X. et al. Numerical evaluation of acoustic characteristics of a thrust chamber with quarter-wave resonators // Science China Technological Sciences. – 2021. – Т. 64. – №. 2. – С. 375–386.
14. Putra P. H. M. et al. A review of microwave pyrolysis as a sustainable plastic waste management technique // Journal of environmental management. – 2022. – Т. 303. – С. 114240.