

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР И АНАЛИЗ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

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 15.09.2025)

Повышение урожайности и стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур остается одной из приоритетных задач современного земледелия. В условиях изменения климата, дефицита водных ресурсов и роста фитопатогенной нагрузки особое значение приобретает качество семян, которое напрямую определяет их всхожесть, энергию прорастания и последующую продуктивность растений. Научно обосновано, что предпосевная обработка семян играет ключевую роль в активации физиологических процессов, повышении полевой всхожести и формировании более жизнеспособных всходов. Кроме того, такие процедуры позволяют существенно сократить распространение инфекций и снизить риск поражения растений болезнями уже на ранних этапах вегетации, что в конечном итоге обеспечивает стабильное повышение урожайности.

Традиционные способы обработки – химическое протравливание, термостатирование в горячей воде, конвективная тепловая сушка – применяются в практике достаточно широко. Однако каждый из них имеет ряд существенных ограничений: высокая энергозатратность и длительность процесса, использование значительного объема химических реагентов, необходимость строгого контроля дозирования и утилизации отходов. Это не только увеличивает себестоимость технологии, но и создает экологические риски, что противоречит современным требованиям устойчивого сельского хозяйства.

В этом контексте все большую актуальность приобретает микроволновая обработка семян, основанная на сочетании теплового и нетеплового воздействия электромагнитного поля. Исследования показывают, что при обработке пшеницы и ячменя наблюдается ускоренное прорастание и снижение зараженности грибковыми инфекциями. В случае кукурузы и сои технология способствует формированию более мощной корневой системы и лучшей адаптации растений к засухе. Метод обеспечивает равномерное нагревание семенного материала, инактивацию патогенной микробиоты и при этом сохраняет высокую биологическую ценность семян. Отсутствие химических остатков и многократное сокращение времени обработки делают микроволновую технологию перспективным направлением модернизации оборудования и внедрения экологически чистых решений в системе предпосевной подготовки семян.

Ключевые слова: микроволновая обработка; предпосевная стимуляция; обеззараживание семян; зернобобовые сельскохозяйственные культуры.

Increasing crop yields and stress resistance remains a priority in modern agriculture. In the face of climate change, water shortages, and increasing phytopathogenic pressure, seed quality is particularly important, directly determining germination, vigor, and subsequent plant productivity. It has been scientifically proven that pre-sowing seed treatment plays a key role in activating physiological processes, increasing field germination, and developing more viable seedlings. Furthermore, such procedures significantly reduce the spread of infections and decrease the risk of plant diseases early in the growing season, ultimately ensuring a consistent increase in yield. Traditional seed treatment methods—chemical dressing, hot water thermostating, and convective heat drying—are widely used in practice. However, each has a number of significant limitations: high energy consumption and process time, the use of significant amounts of chemical reagents, and the need for strict dosage control and waste disposal. This not only increases the cost of the technology but also creates environmental risks, which conflicts with modern sustainable agriculture requirements.

In this context, microwave seed treatment, based on a combination of thermal and non-thermal electromagnetic fields, is becoming increasingly relevant. Research shows that microwave seed treatment accelerates germination and reduces fungal infections in wheat and barley. In the case of corn and soybeans, the technology promotes the development of a more robust root system and better adaptation of plants to drought. The method ensures uniform heating of the seed, inactivation of pathogenic microbiota, while preserving the high biological value of the seeds. The absence of chemical residues and a significant reduction in processing time make microwave technology a promising approach for modernizing equipment and implementing environmentally friendly solutions in pre-sowing seed preparation systems.

Key words: microwave treatment; pre-sowing stimulation; seed disinfection; grain legume crops.

Введение

Качество семян напрямую определяет урожайность и товарные свойства продукции растениеводства. Еще большую актуальность этот показатель приобретает в условиях изменения климата, дефицита водных ресурсов и роста фитопатогенной нагрузки.

Предпосевная обработка семенного материала рассматривается как важнейшая агротехническая мера, обеспечивающая стабильную и высокую продуктивность, а также комплексную профилактику заболеваний и повышение жизнеспособности семенного материала. Научно обосновано [1], что предпосевная обработка семян играет ключевую роль в активации физиологических процессов, повышении полевой всхожести и формировании более жизнеспособных всходов. Кроме того, такие процедуры позволяют существенно сократить распространение инфекций и снизить риск поражения

растений болезнями уже на ранних этапах вегетации, что в конечном итоге обеспечивает стабильное повышение урожайности.

Распространенные методы, к числу которых относятся химическое протравливание, дражирование, инкрустация, горячее водное обеззараживание и конвективная сушка, достаточно широко применяются на практике и доказали свою эффективность. Однако каждый из них имеет ряд существенных ограничений: высокая энергозатратность и длительность процесса, использование значительного объема химических реагентов, необходимость строгого контроля дозировок и утилизации отходов [2, 3]. Это не только увеличивает себестоимость технологии производства семян, но и создает экологические риски, что противоречит современным требованиям устойчивого развития сельского хозяйства и его экологичности.

В этом контексте все большую актуальность приобретает микроволновая обработка семян, основанная на сочетании теплового и нетеплового воздействия электромагнитного поля. Исследования показали, что при обработке пшеницы и ячменя наблюдается ускоренное прорастание и снижение зараженности грибковыми инфекциями [4]. В случае кукурузы и сои технология способствует формированию более мощной корневой системы и лучшей адаптации растений к засухе, а также повышению энергии прорастания и устойчивости к неблагоприятным факторам среды [5]. Метод обеспечивает равномерное нагревание семенного материала, инактивацию патогенной микробиоты и при этом сохраняет высокую биологическую ценность семян. Отсутствие химических остатков и многократное сокращение времени обработки делают микроволновую технологию перспективным направлением модернизации оборудования и внедрения экологически чистых решений в системе предпосевной подготовки семян.

За последние годы микроволновая обработка благодаря сверхбыстрому нагреву, сокращенному времени воздействия, отсутствию химических остатков и технологической интегрируемости (рис. 1) привлекла значительное внимание исследователей, продемонстрировав существенный потенциал в предпосевной подготовке семян [6, 7].

Традиционные методы предпосевной обработки	Перспективы микроволновой обработки
<ul style="list-style-type: none"> • Химическое протравливание • Термостабилизирование в горячей воде • Конвективная тепловая сушка • Дражирование • Инкрустация 	<ul style="list-style-type: none"> • Сочетание теплового и нетеплового воздействия • Ультракраткое и равномерное нагревание • Инактивизация патогенной микробиоты
Недостатки	Преимущества
<ul style="list-style-type: none"> • Высокая энергозатратность и продолжительность процесса • Необходимость использования больших объемов химических веществ 	<ul style="list-style-type: none"> • Сокращение времени обработки • Отсутствие химических остатков • Экологическая безопасность и высокая эффективность

Рис. 1. Перспективы микроволновой обработки семян для улучшения их качества

Несмотря на достигнутые результаты, подавляющее большинство работ сосредоточено на лабораторных испытаниях, тогда как исследования, направленные на изучение различных культур, уточнение режимов обработки и разработку инженерных решений для практического применения, все еще недостаточно развиты.

Целью представленных материалов и исследований является систематизация и критический анализ современных данных о предпосевной микроволновой обработке семян зернобобовых культур. В фокусе анализа находятся биофизические механизмы взаимодействия электромагнитного поля с семенным материалом, а также характеристики параметров и режимов воздействия. Особое внимание уделено рассмотрению тепловых и нетепловых эффектов, формирующихся в семенах под действием микроволнового излучения, с целью обоснования их влияния на повышение посевных и качественных показателей семян, а также причинам, сдерживающим внедрение этой технологии в их производство.

Основная часть

Микроволны представляют собой электромагнитное излучение диапазона частот от 300 МГц до 300 ГГц. Наиболее широко в агротехнологиях используется промышленный диапазон 2,45 ГГц, кото-

рый обеспечивает эффективное поглощение энергии водой и другими полярными молекулами. Основным физическим механизмом является диэлектрический нагрев. Под действием переменного электромагнитного поля молекулы воды, жиры и белки в семенах, обладающие дипольным моментом, начинают быстро изменять свое ориентационное положение, стремясь согласоваться с направлением этого поля. Высокая частота колебаний (миллиарды раз в секунду) приводит к интенсивному трению между молекулами, что сопровождается выделением тепла в объеме материала. В отличие от конвективного или контактного нагрева, тепло при микроволновом воздействии возникает внутри семени, что обеспечивает: равномерное распределение температуры в объеме; ультракороткое время нагрева; отсутствие перегрева поверхности при достаточном контроле мощности.

Кроме теплового действия, микроволновое поле оказывает и нетепловые эффекты: изменение проницаемости клеточных мембран; активация ферментативных систем; стимуляция обменных процессов на клеточном уровне.

Данные эффекты способствуют прерыванию покоя семени и повышению его энергии прорастания. Эти же явления рассматриваются как возможные факторы повышения стрессоустойчивости семян [8].

Комбинация тепловых и нетепловых эффектов обеспечивает инактивацию спор грибов, бактерий и вирусов, находящихся на поверхности и внутри семян, тем самым снижая риск последующих заболеваний растений [9]. При этом не образуются химические остатки, как при протравливании, что является экологическим преимуществом метода.

Таким образом, микроволновая обработка семян основана на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую внутри влажных структур семенного материала, сопровождаемую дополнительными нетепловыми эффектами, которые усиливают физиологическую активность и снижают инфекционную нагрузку.

Синергия теплового и нетеплового действий обеспечивает одновременное повышение жизнеспособности и обеззараживание семян, а совокупный механизм проиллюстрирован на рис. 2.



Рис. 2. Схематическое представление механизма действия микроволновой предпосевной обработки

За последние годы отечественные и зарубежные исследователи добились существенных успехов в изучении воздействия микроволн на семена зерновых и бобовых культур. Экспериментальные данные показывают, что кратковременная обработка семенного материала сельскохозяйственных культур микроволнами невысокой мощности повышает их лабораторную всхожесть на 5–12 %, снижает инфицированность грибами видов *Fusarium* и *Alternaria* более чем на 80 %, способствует формированию мощной корневой системы и улучшает адаптацию растений к засухе и другим стрессам [10, 11].

Достижимый эффект определяется не только сочетанием мощности, частоты и продолжительности воздействия, но также исходным содержанием влаги в семенах, схемой пакетной обработки и однородностью распределения микроволнового поля [12].

Причинами ограниченного внедрения микроволновой обработки семян в сельском хозяйстве являются:

– *недостаточная теоретическая база и стандартизация этого процесса*: отсутствие полноценных моделей, связывающих физические параметры микроволн (мощность, частоту, время воздействия) с биологической реакцией семян; недостаток данных для унификации процесса;

– *технические сложности масштабирования*: однородное распределение микроволнового поля в больших объемах семян трудно обеспечить, что приводит к локальному перегреву или недостаточному прогреву отдельных семян; разработка промышленных установок, способных безопасно и эффективно обрабатывать большие партии семян, требует значительных инвестиций и инженерных решений;

– *отсутствие экономической обоснованности на текущем этапе*: внедрение микроволновых установок требует первоначальных капиталовложений и переоборудования линий подготовки семян; для фермеров и производителей семян традиционные методы дешевле и привычнее, несмотря на экологические недостатки.

– *ограниченность данных по долгосрочному эффекту*: недостаточно исследований, оценивающих влияние микроволн на урожайность, стрессоустойчивость и жизненный цикл растений в полевых условиях, что снижает доверие к технологии со стороны агропроизводителей.

– *слабая интеграция с существующими агротехнологиями*: микроволновая обработка не всегда свободно интегрируется в существующие линии предпосевной подготовки семян; требует разработки новых стандартов контроля влажности, температуры и времени обработки семян, а также обучения персонала;

– *научно-технологический разрыв*: большинство исследований сосредоточено на лабораторных экспериментах, тогда как промышленное внедрение требует инженерного, экономического и агрономического обоснования.

По сравнению с традиционными химическими технологиями предпосевной обработки семян микроволновая технология обладает заметными преимуществами в эффективности, экологической безопасности и возможности интеграции оборудования, демонстрируя при этом широкую универсальность. Тем не менее морфологические различия семян различных культур и неоднородное распределение влаги обуславливают вариативность оптимальных режимов, а неравномерность микроволнового поля может приводить к локальному перегреву или недостаточному прогреву отдельных фракций. Эти факторы остаются ключевыми ограничениями при переходе к промышленному использованию данной технологии.

Нами была произведена сравнительная характеристика различных методов предпосевной обработки семян (таблица). Представленные в этой таблице соотношения нужно рассматривать не только как теоретические преимущества, но и как практические критерии целесообразности внедрения микроволновой линии предпосевной подготовки семян. Короткое время воздействия подтверждается удержанием стабильного температурного профиля без признаков поверхностного потемнения. Эффективность обеззараживания проявляется в уменьшении доли контаминированных проб при неизменной или повышенной энергии прорастания. Экологическая нейтральность устанавливается отсутствием химических остатков в технологической цепочке подготовки семян.

Сравнение микроволновой обработки с распространенными методами обеззараживания семян

Метод	Время обработки	Эффективность обеззараживания	Влияние на всхожесть	Экологическое воздействие	Стоимость
Химическое протравливание	Средняя	Высокая	Возможное угнетение	Остаточные химические вещества	Средняя
Горячее водное обеззараживание	Длительное	Средняя	Риск термического повреждения	Отсутствие остаточных веществ	Средне-высокая
Конвективная термическая сушка	Длительное	Средняя	Возможная избыточная потеря влаги	Отсутствие остаточных веществ	Высокая
Микроволновая обработка	Краткое (секундный диапазон)	Высокая	Повышение или сохранение	Отсутствие остаточных веществ	Средняя

В инженерном плане эти положения реализуются через последовательную встройку СВЧ – активатора в поточный процесс. Конфигурация встраиваемого узла предполагает волновод с выравниванием распределения поля, вращающийся стол или шнековый питатель, а также температурный контроль в массе материала при помощи инфракрасного пирометра и термодпары, установленной в репрезентативной фракции. Система контроля качества включает экспресс-оценку температурного профиля партии, определение лабораторной всхожести и микологические испытания. Требования безопасности обеспечиваются экранированием камеры, регулярным контролем утечек СВЧ и соблюдением норм охраны труда, а оценка посевных показателей выполняется в соответствии с методиками ISTA.

Заключение

Микроволновая предпосевная обработка представляет собой физический метод, одновременно обеспечивающий обеззараживание и физиологическую активацию семян. Технология позволяет в кратчайшие сроки существенно снизить инфицированность семенного материала патогенами и в большинстве случаев сохранить либо повысить показатели всхожести. По сравнению с традиционными способами метод отличается отсутствием химических остатков, высокой эффективностью. Многочисленные отечественные и зарубежные исследования подтверждают, что при рациональном подборе мощности, времени воздействия и влажности семян можно добиться эффективного фитосанитарного эффекта без ущерба для жизнеспособности семян.

Несмотря на очевидные преимущества микроволновой обработки семян, данный метод пока не получил широкого внедрения в сельском хозяйстве. Основными причинами этого являются недостаточная теоретическая база и отсутствие универсальных моделей, связывающих параметры электромагнитного воздействия с биологической реакцией семян, а также трудности масштабирования технологии на промышленные объемы. Дополнительным сдерживающим фактором является ограниченность данных о долгосрочном влиянии микроволн на урожайность и стрессоустойчивость растений. Кроме того, слабая интеграция микроволновой обработки с существующими агротехнологическими линиями требует разработки новых стандартов контроля процессов и дополнительного обучения персонала. Решение этих проблем требует комплексного подхода, включающего фундаментальные исследования, инженерные разработки и агрономические испытания.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить на повышении энергетической эффективности микроволновых установок, обеспечении однородности распределения электромагнитного поля и разработке адаптивных режимов для различных культур, что ускорит внедрение данной технологии в аграрное производство в качестве альтернативы традиционным технологиям предпосевной их обработки и стимулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jatana B. S., Grover S., Ram H., Baath G. S. Seed Priming: Molecular and Physiological Mechanisms Underlying Biotic and Abiotic Stress Tolerance // *Agronomy*. – 2024. – Vol. 14, № 12. – P. 2901.
2. Nelson S. O. Microwave and radio frequency applications in agriculture // *Food Engineering Reviews*. – 2011. – Vol. 3, № 3–4. – P. 143–158.
3. Brodie G., Jacob M. V., Farrell P. Microwave technologies as part of an integrated weed management strategy: A review // *International Journal of Agronomy*. – 2012. – Article ID 636905. – DOI: 10.1155/2012/636905.
4. Benabderrahim M. A., Bettaieb I., Hannachi H., Rejili M., Dufour T. Cold plasma treatment boosts barley germination and seedling vigor: Insights into soluble sugar, starch, and protein modifications // *Journal of Cereal Science*. – 2024. – Vol. 116. – P. 103852.
5. Recek N., et al. Germination and Growth of Plasma-Treated Maize Seeds Planted in Fields and Exposed to Realistic Environmental Conditions // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, № 7. – P. 6868.
6. Курзенков, С. В. Изучение факторов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур, и мероприятия по улучшению этого показателя / С. В. Курзенков, Цзюньянь Лу // *Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: материалы Международной научно-практической конференции* / редкол.: В. И. Желязко (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2025. – С. 92–98.
7. Wu X., Li Y., Gao H., et al. Influence of microwave treatment on seed vigor and fungal infection in maize // *Crop Protection*. – 2019. – Vol. 119. – P. 16–22.
8. Abubakar M., Alghanem S. M. S., Alhaithloul H. A. S., et al. Microwave seed priming and ascorbic acid assisted phytoextraction of heavy metals through spinach // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2024. – Vol. 282. – P. 116731.
9. Jiao S., Deng Y., Yang X., et al. Effects of microwave treatment on germination and seedling growth of wheat seeds // *Journal of Cereal Science*. – 2018. – Vol. 83. – P. 110–116.
10. Zhang H., Xu F., Wu X., et al. Microwave-assisted seed priming improves germination and seedling growth in soybean // *Industrial Crops and Products*. – 2020. – Vol. 154. – P. 112696. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112696.
11. Vian A., Davies E., Gendraud M., Bonnet P. Plant responses to high frequency electromagnetic fields // *BioMed Research International*. – 2016. – Article ID 1830262. – DOI: 10.1155/2016/1830262.
12. Kaur S., Kapoor S., Sandhu J. S. Physical and biochemical changes in wheat seeds induced by microwave treatment // *Plant Growth Regulation*. – 2005. – Vol. 47, № 3. – P. 201–210.