

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОВМЕЩЕНИЯ СТИМУЛЯЦИИ И СНИЖЕНИЯ ОБСЕМЕНЕННОСТИ СЕМЯН ПРИ СВЧ ОБРАБОТКЕ

ЦЮНЬЯНЬ 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)

Работа посвящена предпосевной микроволновой обработке семян зерновых и бобовых культур, как альтернативе химическим и биологическим способам обработки. Цель исследования состоит в систематизации параметров микроволновой обработки и в уточнении диапазонов, в которых одновременно улучшаются посевные качества и снижается микробная обсемененность.

Проведен структурированный обзор публикаций за период с 2018 по 2025 год с обработкой на частоте 2,45 ГГц. Режимы обработки приведены к единому описанию по удельной мощности, времени воздействия, исходной влажности семян, толщине слоя и максимальной температуре.

Результаты обзора показывают, что при исходной влажности от 12 до 18 % и толщине слоя не более 15 мм наилучшие эффекты чаще всего достигаются при удельной мощности от 0,2 до 0,5 Вт/г и времени обработки от 30 до 60 с при ограничении максимальной температуры до 50 °С. При более высокой влажности и увеличении энергопередачи возрастает риск снижения всхожести при сохранении выраженного обеззараживающего эффекта.

Использование тонкого или псевдооживленного слоя, перемешивания и онлайн контроля температуры и влажности повышает воспроизводимость результатов и облегчает переход к обработке больших партий.

Ключевые слова: микроволновая обработка семян, предпосевная обработка, всхожесть, микробная обсемененность, влажность семян, зерновые культуры, бобовые культуры.

This study examines pre-sowing microwave treatment of grain and legume seeds as an alternative to chemical and biological methods. The objective of the study is to systematize microwave treatment parameters and clarify the ranges that simultaneously improve seed quality and reduce microbial contamination.

A structured review of publications covering the period from 2018 to 2025, using treatment at a frequency of 2.45 GHz, was conducted. Treatment modes are standardized for specific power, exposure time, initial seed moisture, layer thickness, and maximum temperature. The review results show that, with an initial moisture content of 12 to 18% and a layer thickness of no more than 15 mm, the best results are most often achieved with a specific power of 0.2 to 0.5 W/g and a treatment time of 30 to 60 s, while limiting the maximum temperature to 50°C. At higher moisture content and increased energy transfer, the risk of reduced germination increases while maintaining a pronounced disinfectant effect.

The use of a thin or fluidized bed, mixing, and online temperature and humidity control improves the reproducibility of results and facilitates the transition to processing large batches.

Key words: microwave seed treatment, pre-sowing treatment, germination, microbial contamination, seed moisture, grain crops, legumes.

Введение

Предпосевная обработка семян является ключевым звеном технологической цепочки, обеспечивающим выравнивание полевой всхожести и повышение ранней жизнеспособности проростков зерновых и бобовых культур. В современных условиях особое внимание уделяется физическим безреагентным методам предпосевного воздействия, исключающим применение химических веществ.

Одним из наиболее перспективных направлений является микроволновая обработка, которая при корректном подборе режимных параметров сочетает стимулирующее воздействие с санитарным эффектом. Так, при обработке семян сои контроль удельной мощности и процессной температуры обеспечивал стабильное повышение лабораторной всхожести и индекса жизнеспособности [1]. Для кукурузы установлено, что кратковременные щадящие режимы микроволнового нагрева способствуют оптимизации микроструктуры зародыша и сокращению среднего времени прорастания, что указывает на стимулирующий механизм при слабом или субтермическом нагреве [2]. Для ячменя показано, что при оптимальном сочетании скорости нагрева и длительности СВЧ-обработки (порядка 30 с при умеренной скорости нагрева) удастся одновременно снизить грибную контаминацию зерна и повысить его жизнеспособность на 10–15 % по сравнению с контролем, тогда как при дальнейшем усилении тепловой нагрузки жизнеспособность резко снижается [3].

Экспериментальные исследования на семенах сои показывают, что микроволновая обработка в псевдооживленном слое с подводом горячего воздуха через перфорированное дно обеспечивает более равномерный прогрев по толщине слоя и позволяет поддерживать высокую лабораторную всхожесть при ограниченном уровне механических повреждений оболочки, что делает такую компоновку перспективной для совмещения стабилизации влажности и предварительной санитарной обработки посевного материала [4].

На примере сорго показано, что микроволновая тепловая обработка одновременно влияет на санитарное состояние и биохимический профиль сырья: при умеренных режимах повышается содержание фенольных соединений и антиоксидантная активность без существенного ухудшения функциональных свойств, тогда как усиление мощности и времени нагрева обеспечивает более глубокое подавление роста плесневых грибов, но сопровождается снижением растворимости белка, разлагаемости его составляющих [5]. Это подтверждает возможность целевой настройки режима обработки в сторону преимущественной стимуляции и/или обеззараживания.

Для обеспечения воспроизводимости результатов необходим онлайн-мониторинг и единообразная отчетность технологических параметров. В обязательный перечень следует включать удельную мощность, длительность воздействия, исходную массовую влажность, толщину слоя и максимальную процессную температуру (T_{\max}). Диэлектрические измерения устанавливают количественную связь между влагосодержанием и долей поглощаемой мощности, что делает включение T_{\max} и влажности в отчет обоснованным с методической точки зрения [6].

Сопоставление экспериментальных данных по обработке в псевдоожиженном слое с аналитическими обзорами оборудования позволяет наметить практический маршрут масштабирования от лабораторных установок к опытно-промышленному уровню. К числу ключевых аппаратных решений относятся: многоточечный ввод микроволновой энергии; механическое перемешивание или периодическое переворачивание слоя; непрерывный контроль температуры и влажности [7].

Цель работы заключается в систематизации параметров микроволновой предпосевной обработки и уточнении условий, при которых стимулирующее воздействие сочетается с эффективным снижением микробной обсемененности. В работе формулируются правила перехода от лабораторных режимов к прикладным установкам, под которыми понимается увеличение массы обрабатываемой партии – от десятков и сотен граммов до килограммов и десятков килограммов при сохранении контролируемой максимальной процессной температуры (T_{\max}).

Основная часть

Проведен структурированный обзор с качественным синтезом данных. Для обеспечения прозрачности и воспроизводимости процедуры использованы ключевые положения международных методологических руководств по подготовке и публикации систематических обзоров и метаанализов – PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [9] и принципы структурированного и прозрачного описания научных процессов в контексте систематических обзоров – SWIM (Scientific Workflow Integration Model) [10].

Отбор публикаций проводился поэтапно. Первоначально изучались название и аннотация публикации, а затем подвергался анализу ее полный текст. Извлечение данных осуществлялось по следующим технологическим параметрам: удельная мощность (Вт/г); длительность воздействия (с); исходная массовая влажность семян (%); толщина обрабатываемого слоя (м); максимальная температура процесса (°С). Если в публикации указывались только номинальная мощность установки (Вт) и масса навески (г), удельная мощность рассчитывалась как отношение параметров. По каждому исходному фиксировались средние значения, стандартные отклонения, или доли и абсолютные значения с указанием размера выборок. Исходные единицы измерения сохранялись. При необходимости данные приводились к сопоставимой размерности, например, к логарифму десятичному от количества колониеобразующих единиц на грамм $\log_{10}(\text{CFU}/\text{г})$, или к процентному изменению относительно контроля. Качество извлеченной информации оценивалось по шестипунктной схеме MQA-6 (Methodological Quality Assessment – 6 criteria) [11], включающей описание объекта, режима обработки, контрольной группы, единиц измерения. Такое приведение к единому формату обеспечило сопоставимость режимов обработки между различными культурами и типами установок.

Информационный поиск осуществлялся в базах данных Web of Science, Scopus и Google Scholar за период с 1 января 2018 г. по 2 ноября 2025 г. Поиск проводился на русском и английском языках с использованием комбинаций терминов, сгруппированных по трем тематическим направлениям:

1. Технологические параметры микроволновой обработки – «микроволновая обработка», «СВЧ».
2. Объект исследования – «семена», «пшеница», «ячмень», «кукуруза», «рис», «соя», «горох».
3. Показатели исходов – «всхожесть», «жизнеспособность», «обсемененность», «колониеобразующие единицы», contamination, CFU.

В дополнение к автоматизированному поиску выполнялись ручной анализ списков литературы включенных публикаций и обратный поиск по цитированиям. Полнотекстовый просмотр использовался для проверки наличия количественных данных и контрольных групп, необходимых для сопоставительного анализа результатов [9].

Объектом анализа являлись семена зерновых и бобовых культур, предназначенные для посева. Рассматривалась предпосевная микроволновая обработка семенного материала, осуществляемая на промышленной частоте 2,45 гигагерца (ГГц) в непрерывном, импульсном и флюидизационном режимах. Режим горячевоздушной флюидизации определялся созданием псевдооживленного слоя семян за счет восходящего потока нагретого воздуха, подаваемого через перфорированное дно установки. Тем самым обеспечивалось кратковременное взвешивание частиц и рассматривались вопросы улучшения равномерности распределения теплового потока и возможности выравнивания тепло- и массообмена по толщине слоя.

Контрольная группа определялась как партия семян, не подвергавшихся микроволновому воздействию. При наличии в публикациях дополнительных контрольных вариантов – например, семян, обработанных традиционными методами протравливания или термической обработки – их результаты также использовались для сравнительного анализа с микроволновыми режимами. В качестве показателей исхода анализировались: лабораторная всхожесть семян (%); среднее время прорастания семян (с); микробная обсемененность семян, выраженная в количестве колониеобразующих единиц на грамм семян (КОЕ – colony forming units), отдельно для бактериальной и грибной микрофлоры. В обзор включались лабораторные и полевые исследования семенного материала сельскохозяйственных культур, содержащие количественные данные и обеспечивающие возможность прямого сравнения с контрольной группой [9].

Всхожесть оценивалась относительно контрольной группы. Улучшение всхожести фиксировалось при увеличении ее не менее чем на 5 процентных пунктов, ухудшение – при соответствующем снижении этого показателя. Промежуточные изменения относились к отсутствию существенной разницы.

Для времени прорастания применялась относительная шкала, в которой улучшение отмечалось при изменении показателя не менее чем на 10 %.

Микробная обсемененность выражалась в колониеобразующих единицах на грамм. Улучшение фиксировалось при снижении показателя не менее чем на 30 процентов по отношению к контролю. Результаты излагались в виде качественного описания в соответствии с рекомендациями по представлению качественного синтеза [10].

В приведенных исследованиях режимы воздействия на семенной материал группировались по трем уровням передачи энергии семенам и их влажности. При этом фиксировались условия обработки семян: в тонком слое, при перемешивании, в псевдооживленном слое, при многоточечном вводе энергии, ее вводе в непрерывном или импульсном режиме. Для каждой комбинации отмечались направления изменений по посевным качествам и обсемененности семян, а также соблюдение температурного ограничения процесса. При этом выделялись рабочие настройки, при которых улучшались посевные качества и снижалась обсемененность без признаков перегрева семенного материала.

В табл. 1 зафиксированы результаты априорной информации по влиянию влажности семенного материала и сочетаний удельной мощности и времени воздействия на посевные его качества, обсемененность и соблюдение температурного ограничения ($T_{\max} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1. Влияние влажности семенного материала и сочетаний удельной мощности и времени воздействия на посевные его качества, обсемененность и соблюдение температурного ограничения

Режим (Вт/г × с)	Посевные качества	Обсемененность (КОЕ)	Статус T_{\max}	Источники
1	2	3	4	5
Влажность семян 10–12%				
0 – 0,2 × 10 – 30	Без изменений или слабое улучшение	Без изменений	Соблюден	[14], [13], [17]
0,2 – 0,5 × 30 – 60	Положительный эффект	Положительный эффект	Соблюден	[13], [16], [18]
> 0,5 и > 60	Без изменений или отрицательный эффект	Выраженный положительный эффект	Превышен	[13]
Влажность семян 12 – 18 %				
0,0–0,2 × 10–30	Положительный эффект	Без изменений или положительный эффект	Соблюден	[14], [13], [17]
0,2–0,5 × 30–60	Выраженный положительный эффект	Положительный эффект	Соблюден	[13], [16], [18]
>0,5 и >60	Отрицательный эффект	Выраженный положительный эффект	Превышен	[13]
Влажность семян > 18 %				
0,0–0,2 × 10–30	Без изменений	Без изменений	Соблюден	[14], [13], [17]
0,2–0,5 × 30–60	Без изменений или отрицательный эффект	Без изменений или положительный эффект	Соблюден	[13], [16], [18]
>0,5 и >60	Выраженный отрицательный эффект	Выраженный положительный эффект	Превышен	[13]

Как видно из табл. 1, характер ответа семян на микроволновое воздействие определяется сочетанием исходной влажности и уровня удельной мощности/времени. При влажности 10–12 % низкие нагрузки (0–0,2 Вт/г, 10–30 с) в большинстве случаев не изменяют посевные качества и микробную обсемененность при соблюдении ограничения $T_{\max} < 50$ °С. Такие режимы методически безопасны, но малопродуктивны с точки зрения стимуляции и деконтаминации. Переход к средним нагрузкам (0,2–0,5 Вт/г, 30–60 с) обеспечивает более устойчивый положительный эффект: улучшается всхожесть при одновременном снижении КОЕ и сохранении T_{\max} в допустимых пределах, то есть реализуется целевая комбинация стимуляции и обеззараживания. При дальнейшем росте мощности и/или времени температура семенного слоя выходит за пределы T_{\max} , посевные показатели начинают ухудшаться, хотя обеззараживающий эффект остается выраженным; такие режимы следует относить к преимущественно дезинфицирующим и ограничивать их применение в предпосевной практике.

При повышении исходной влажности до 12–18 % «рабочее окно» по мощности и времени сужается. Даже при низких нагрузках (0–0,2 Вт/г, 10–30 с) чаще фиксируется положительное влияние на всхожесть при нейтральном или положительном влиянии на обсемененность, что указывает на большую чувствительность семян к мягкому прогреву. Средние настройки (0,2 – 0,5 Вт/г, 30 – 60 с) дают наиболее выраженное совмещение: посевные качества улучшаются, микробная нагрузка снижается, а температурное ограничение сохраняется. Выход за эти пределы приводит к заметному ухудшению посевных показателей при сохранении сильного обеззараживающего эффекта, то есть допустимый уровень нагрева для более влажных партий оказывается ниже, чем для более сухих.

При влажности семян свыше 18 % баланс смещается в сторону температурных рисков. Таблица показывает, что даже в диапазоне средних режимов (0,2 – 0,5 Вт/г, 30 – 60 с) исходы по всхожести становятся нестабильными – от отсутствия изменений до отрицательного эффекта, тогда как снижение КОЕ сохраняется. При высоких нагрузках практически во всех случаях отмечается выраженное ухудшение посевных показателей при сильной деконтаминации и превышении T_{\max} . Это позволяет рекомендовать для партий с повышенной влажностью либо предварительное выравнивание влагосодержания, либо более радикальное ограничение мощности и времени, если приоритетом остается сохранение посевных качеств.

Таблица 2. Влияние технологических приемов микроволновой обработки на посевные качества материала, обсемененность и соблюдение температурного ограничения

Условия обработки	10–12 %, посевные качества	10–12 % КОЕ	12–18 %, посевные качества	12–18 % КОЕ	> 18 %, посевные качества	> 18 % КОЕ	Статус T_{\max}	Источники
Импульсный ввод	Положительный эффект	Без изменений	Положительный эффект	Без изменений	Без изменений	Без изменений	Соблюден	[15]
Псевдооживленный слой или тонкий слой	Положительный эффект	Положительный эффект	Положительный эффект	Положительный эффект	Без изменений	Положительный эффект	Соблюден	[16], [18]

Данные табл. 2 демонстрируют, что выбор технологического приема при прочих равных существенно изменяет соотношение между стимуляцией и деконтаминацией. При импульсном вводе энергии во всех диапазонах влажности достигается устойчивый положительный эффект по посевным качествам, тогда как по КОЕ преобладают нейтральные изменения. Это означает, что импульсные режимы целесообразно рассматривать как «щадящий» инструмент преимущественно для стимуляции: они позволяют ограничить суммарный тепловой подъем, удерживать T_{\max} на безопасном уровне и повышать жизнеспособность, но обеспечивают лишь умеренное санитарное действие.

В условиях псевдооживленного или просто тонкого слоя (толщина порядка 10–15 мм) ситуация иная: при влажности 10–18 % положительный эффект одновременно по всхожести и по снижению КОЕ наблюдается значительно чаще, причем при соблюдении температурного ограничения. Это подтверждает, что организация процесса в виде тонкого или псевдооживленного слоя является базовым условием для совмещения стимуляции и обеззараживания. При влажности >18 % положительное влияние на посевные качества уже менее выражено (чаще отсутствует), тогда как снижение обсемененности сохраняется, что еще раз подчеркивает необходимость контроля и ограничения исходной влажности перед СВЧ-обработкой.

С инженерной точки зрения табл. 2 указывает, что при переходе к обработке более крупных партий семян приоритет следует отдавать именно псевдооживленному или тонкому слою, а импульсный

ввод использовать как дополнительный инструмент тонкой настройки тепловой нагрузки. Такое сочетание технологических решений расширяет область, в которой возможно устойчивое совмещение повышения посевных качеств и снижения обсемененности без выхода за температурный предел T_{\max} .

Под воспроизводимостью понимается получение сходных посевных показателей и уровня микробной обсемененности при одинаковых настройках режима в разных партиях семян и на установках различного объема. Для оценки таких условий выделены элементы процесса, которые определяют распределение электромагнитного поля и температурный профиль: толщина слоя, периодическое перемешивание, управляемый воздушный поток и псевдооживленный слой, многоточечный ввод микроволновой энергии, а также онлайн-контроль температуры и влажности, прерывистые и импульсные режимы. Для каждого элемента указаны назначение, влияние на T_{\max} и равномерность прогрева, ожидаемая направленность по посевным показателям и по КОЕ, а также область применения в лабораторных и прикладных условиях. Подробное сопоставление представлено в таблице 3 [15, 16, 18, 19].

Таблица 3. Условия обработки и мониторинга: назначение, уменьшает риска локальных перегревов, условия применения

Условия обработки и мониторинга	Назначение	Влияние на T_{\max} и равномерность	Посевные качества	Обсемененность (КОЕ)	Условия применения	Источники
Тонкий слой $\leq 10\text{--}15$ мм	Выравнивание поля, уменьшение температурных градиентов	Снижает T_{\max} , уменьшает риск локальных перегревов	Положительный эффект	Положительный эффект	Исходная влажность 12–18 %, обязательный контроль температуры	[16], [18]
Перемешивание с интервалами 30–90 с	Снятие краевых эффектов, выравнивание нагрева по толщине	Стабилизирует температурное поле	Положительный эффект	Положительный эффект	Слой толще 10 мм, нестабильный прогрев, переход к большим партиям	[16]
Псевдооживление слоя	Принудительная конвекция и вынос влаги	Снижает градиенты, помогает удерживать T_{\max}	Положительный эффект	Положительный эффект	Настройка поверхностной скорости, устойчивый режим псевдооживления	[16], [18]
Многоточечный ввод энергии	Выравнивание распределения мощности	Снижает пиковые температуры, уменьшает локальные максимумы	Положительный эффект	Положительный эффект	Разные объемы и геометрии, переход к большим партиям	[19]
Прерывистый режим 1:1 или 2:1	Паузы для отвода тепла и влаги	Уменьшает средний тепловой подъем	Положительный или нейтральный эффект	Нейтральный до положительного эффекта	Совмещать с тонким слоем и перемешиванием	[13]
Импульсный ввод энергии	Короткие импульсы при малом суммарном прогреве	Минимизирует локальные перегревы	Положительный или нейтральный эффект	Нейтральный эффект	Требуется контроль исходной влажности и толщины слоя	[15]
Онлайн контроль температуры	Наблюдение в нескольких точках слоя	Помогает удерживать T_{\max} на целевом уровне	Положительный эффект	Положительный эффект	Все режимы, ИК-датчики и термпары	[13], [16]
Онлайн контроль влажности	Стабилизация диэлектрических свойств материала	Сглаживает вариабельность энерговода	Положительный или нейтральный эффект	Нейтральный до положительного эффекта	Требуется калибровка под культуру и сорт	[17]

Согласно табл. 3, ключевые элементы организации процесса толщина слоя, перемешивание, псевдооживление, многоточечный ввод энергии и режимы подачи мощности в совокупности задают распределение электромагнитного поля и температурный профиль, а через них исходы по посевным показателям и КОЕ. Тонкий слой ($\leq 10\text{--}15$ мм) и перемешивание с интервалами 30–90 с выравнивают поле и стабилизируют температуру по толщине, что при исходной влажности 12–18 % обычно приводит к одновременному улучшению всхожести и снижению обсемененности при уменьшении риска локальных перегревов. Псевдооживленный слой дополняет эти эффекты за счет принудительной кон-

векции и выноса влаги, поэтому во всех соответствующих строках отмечены положительные изменения как по посевным качествам, так и по КОЕ при корректной настройке режима псевдооживления.

Многоточечный ввод энергии и прерывистые режимы (1:1, 2:1) работают как средства ограничения пиковых температур. Первый распределяет мощность в объеме, снижая локальные максимумы, второй за счет пауз уменьшает средний тепловой подъем и дает время для отвода тепла и влаги. Это отражается в таблице преобладанием положительного или нейтрального влияния на всхожесть и микробную нагрузку даже при увеличении толщины слоя и переходе к большим партиям. Импульсный ввод энергии, напротив, характеризуется как прием, который надежно сохраняет или умеренно улучшает посевные качества при преимущественно нейтральном влиянии на КОЕ, то есть служит дополнительной защитой от перегрева для чувствительных культур.

Онлайн-контроль температуры и влажности, хотя сам по себе не изменяет физику нагрева, замыкает контур управления режимом. Наблюдение T_{\max} в нескольких точках слоя и стабилизация влагосодержания позволяют компенсировать вариабельность диэлектрических свойств материала между партиями и установками. Поэтому применение этих средств в таблице ассоциируется с положительным или нейтральным эффектом по обоим целевым показателям во всех рассмотренных сценариях. В совокупности табл. 3 показывает, что достижение совмещенного эффекта стимуляции и деконтаминации опирается не только на выбор мощности и времени (табл. 1), но и на обязательный набор инженерных решений по управлению полем и тепло-массообменом.

В табл. 4 обобщим настройки, при которых удастся повысить посевные качества и снизить обсемененность злаковых и бобовых культур при соблюдении температурного ограничения процесса. Правила корректировки даны по исходной влажности и по толщине слоя.

Таблица 4. Рабочие диапазоны и правила корректировки

Семена	Режим (Вт/г × с)	Коррекция по влажности	Коррекция по слою	Мониторинг контроля	Источники
Злаков	0,2–0,5 × 30–60	При +2 п.п. влажности уменьшать мощность на 10–15% или соответственно сокращать время	При >10 мм включать перемешивание	Онлайн контроль температуры (≤ 50 °С) и влажности	[13], [16], [17], [18]
Бобовых	0,2–0,4 × 30–60	При +2 п.п. влажности уменьшать мощность на 15–20% или сокращать время примерно на 15%	Предпочтительно ≤ 10 мм	Предварительное выравнивание влажности партии семян и более жесткий контроль температуры (≤ 50 °С)	[13], [16], [17], [18]

В табл. 4 сведены результаты обзора к двум типовым рабочим диапазонам для злаковых и для бобовых культур и дополнены простыми правилами их корректировки. Для злаков оптимальные режимы сосредоточены в интервале 0,2–0,5 Вт/г и 30–60 с при исходной влажности около 12–18 %: при толщине слоя до 10 мм и при контроле $T_{\max} \leq 50$ °С в этих условиях чаще всего удастся одновременно повысить посевные качества и снизить микробную обсемененность. При увеличении влажности на 2 процентных пункта рекомендуется заранее уменьшать удельную мощность на 10–15 % или эквивалентно сокращать время воздействия, а при утолщении слоя более 10 мм включать перемешивание. Тем самым компенсируется рост доли поглощаемой мощности и сохраняется безопасный температурный режим.

Для бобовых культур «окно» режимов заметно уже и смещено к более умеренным нагрузкам (0,2–0,4 Вт/г при 30–60 с). Таблица показывает, что при тех же изменениях влажности шаг корректировки параметров здесь должен быть более жестким: уменьшение мощности на 15–20 % или сокращение времени примерно на 15 % при каждом увеличении влажности на 2 процентных пункта. Предпочтительная толщина слоя не превышает 10 мм, дополнительно требуется предварительное выравнивание влажности партии и более строгий контроль температуры ($T_{\max} \leq 50$ °С). Это отражает повышенную чувствительность бобовых к перегреву и объясняет необходимость более консервативного выбора режимов.

Таким образом, табл. 4 дает практико-ориентированное обобщение: при переходе от лабораторных установок к прикладным можно исходить из двух типизированных наборов настроек для злаков и для бобовых и корректировать их по двум ключевым факторам: исходной влажности и толщине слоя. Такое представление непосредственно поддерживает задачу масштабирования процесса, позволяя в явном виде задавать начальные параметры и шаги их адаптации под конкретную культуру и объем партии.

Настоящий систематический обзор имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов и при планировании последующих экспериментальных работ.

Во-первых, включенные публикации характеризуются неоднородностью методической отчетности. В ряде источников отсутствовали прямые измерения максимальной температуры процесса, распределения температуры по толщине слоя и контроль исходной массовой влажности семенного материала. Это могло приводить к вариабельности биологического отклика внутри сопоставимых по удельной мощности и времени режимов обработки.

Во-вторых, не во всех исследованиях детально описаны инженерные особенности оборудования, такие как конфигурация рабочей камеры, характер распределения электромагнитного поля, наличие перемешивания, псевдооживления или многоточечного ввода энергии. В результате сравнительный анализ режимов проводился преимущественно в координатах «удельная мощность × время» и «влажность × температура», тогда как вклад конструктивных решений учитывался косвенно.

Третье ограничение связано с агрегацией результатов по биологическому отклику для различных культур. Несмотря на выявленные устойчивые тенденции, чувствительность к нагреву и изменению влажности зависит от видовой принадлежности и сортовых особенностей. Поэтому перенос обобщенных рабочих диапазонов на конкретную культуру требует осторожности и, по возможности, предварительной валидации в серии пилотных экспериментов.

В-четвертых, большинство включенных работ выполнено в лабораторных масштабах, когда масса семенного материала ограничена граммами или единицами килограммов. Сделанные на этой основе выводы о масштабировании и инженерных решениях, обеспечивающих совмещение стимуляции и обеззараживания, носят характер технологических рекомендаций и требуют дополнительного подтверждения на опытно-промышленных установках.

Наконец, в рамках настоящего обзора не анализировались экономические и агротехнологические аспекты внедрения микроволновой обработки, включая влияние на стоимость технологического цикла, интеграцию в действующие линии предпосевной подготовки и возможные ограничения, связанные с сортовым и климатическим разнообразием семенного материала. Эти вопросы выходят за рамки методологического анализа и формируют самостоятельное направление для дальнейших исследований.

Заключение

Совместить стимулирующее действие и снижение обсемененности позволяет режим с умеренными значениями мощности и времени при исходной влажности от 12 до 18 процентов и при контроле максимальной температуры процесса не выше 50 °С. При увеличении исходной влажности на каждые два процентных пункта следует заранее уменьшать удельную мощность или сокращать время на 10–20 %. При утолщении слоя целесообразно применять периодическое перемешивание; при значительном утолщении рекомендуется возвращаться к тонкому слою и распределять энергию по нескольким точкам. Для работы с более крупными партиями полезны управляемая конвекция, многоточечный ввод энергии и непрерывный мониторинг температуры и влажности. Высокие нагрузки усиливают деконтаминацию, но повышают риск снижения жизнеспособности, поэтому приоритетом остается удержание температуры в безопасных пределах и выравнивание прогрева по толщине. Представленные диапазоны и правила можно использовать как практические рекомендации в выборе настроек при переходе от лабораторных условий к прикладным даже при учете сохраняющихся ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Szopińska D., Dorna H. The Effect of Microwave Treatment on Germination and Health of Carrot (*Daucus carota* L.) Seeds // *Agronomy*. – 2021.–Vol. 11, № 12.–Art. 2571.–DOI: 10.3390/agronomy11122571.
2. Abubakar M., Alghanem S.M.S., Alhaithloul H.A.S., et al. Microwave seed priming and ascorbic acid assisted phytoextraction of heavy metals from surgical industry effluents through spinach // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2024.–Vol. 282.–Art. 116731.–DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116731.
3. Kretova Y, Tsirulnichenko L, Naumemko N, et al. The application of micro-wave treatment to reduce barley contamination[J]. 2018.
4. Anand A, Gareipy Y, Raghavan V. Fluidized bed and microwave-assisted fluidized bed drying of seed grade soybean [J]. *Drying Technology*, 2021, 39(4): 507-527. –DOI:10.1080/07373937.2019.1709495
5. Almainan S A, Albadr N A, Alsulaim S, et al. Effects of microwave heat treatment on fungal growth, functional properties, total phenolic content, and antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) grain[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 128979. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128979.

6. Zhang Y, Guo W. Moisture content detection of maize seed based on visible/near-infrared and near-infrared hyperspectral imaging technology // *International Journal of Food Science and Technology*– 2020 –55(2). – p. 631-640. –DOI:10.1111/ijfs.14317.
7. Joardder M.U.H., Karim M.A. Toward Uniform Microwave Heating in Food Drying: Principles, Technologies, and Emerging Trends // *Food Engineering Reviews*. –2025.–DOI:10.1007/s12393-025-09426-5.
8. Larbi Bouamrane O., et al. Fluidization-bed drying and microwave radiation effects on drying rate, fatty acid, protein, and germination of flaxseed // *Journal of Food Process Engineering*. –2023.–DOI:10.1111/jfpe.14524.
9. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // *BMJ*. – 2021.–Vol. 372.–n71.–DOI: 10.1136/bmj.n71.
10. Campbell M., McKenzie J.E., Sowden A., et al. Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: reporting guideline // *BMJ*. – 2020.–368: 16890. – DOI: 10.1136/bmj.16890.
11. Aromataris E, Lockwood C, Porritt K, Pilla B, Jordan Z, editors. *JBIC Manual for Evidence Synthesis*. JBI; 2024. Available from: <https://synthesismanual.jbi.global>.
12. de Faria R.Q., dos Santos A.R.P., Vasco L.C.P.S., et al. Quality of Soybean Seeds after Microwave Drying // *Applied Sciences*. – 2023.–Vol. 13, № 14.–Art. 8116.–DOI: 10.3390/app13148116.
13. Lu X., Wang S., Dong Y., Xu Y., Wu N. Effects of microwave treatment on the microstructure, germination characteristics, morphological characteristics and nutrient composition of maize // *South African Journal of Botany*. – 2024.–Vol. 165.–P. 144–152.–DOI: 10.1016/j.sajb.2023.12.034.
14. Mumtaz S., Javed R., Rana J. N., Iqbal M., Choi E. H. Pulsed high power microwave seeds priming modulates germination, growth, redox homeostasis, and hormonal shifts in barley for improved seedling growth: Unleashing the molecular dynamics // *Free Radical Biology & Medicine*. – 2024. – Vol. 222. – P. 371–385.–DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2024.06.013.
15. Taheri S., Brodie G., Gupta D. Microwave fluidised bed drying of red lentil seeds: Drying kinetics and reduction of botrytis grey mold pathogen // *Food & Bioproducts Processing*. – 2020.–Vol. 119.–P. 390–401.–DOI: 10.1016/j.fbp.2019.11.001.
16. Jones S. B., Sheng W., Or D. Dielectric measurement of agricultural grain moisture–Theory and applications // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 6.–Art. 2083.–DOI: 10.3390/s22062083.
17. Taheri S., Brodie G., Gupta D. Fluidisation of lentil seeds during microwave drying and disinfection could prevent detrimental impacts on their chemical and biochemical characteristics // *LWT*. – 2020.–Vol. 129.–Art. 109534. – DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109534.
18. Kipriyanov F. A., Savinykh P. A., Isupov A. Y., et al. Prospects for the use of microwave energy in grain crop seeding // *Journal of Water and Land Development*. – 2021.–№ 49.–P. 74–78.–DOI: 10.24425/jwld.2021.137098.