

APPLICATION OF MICROWAVE RADIATION FOR SEED PRE-SOWING
TREATMENT (REVIEW)

O. N. Bakhchevnikov, A. V. Braginets

*Agricultural Research Centre Donskoy
Zernograd, Rostov Region, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: oleg-b@list.ru

Received 22.05.2023

Submitted 14.07.2023

Abstract

Introduction. Exposure to microwave electromagnetic radiation is one of effective physical methods of seed pre-sowing treatment. The aim of the research – review and critical analysis of scientific publications, describing the microwave radiation application for seed pre-sowing treatment to determine the prospects of its use in agriculture. **Materials and methods.** The review of scientific literature on the stated topic for 2013-2023 was carried out. The study consisted of the following stages: scientific literature search, its evaluation and selection, data synthesis and analysis. **Results and conclusions.** It was found that although intensive treatment of seeds with microwave radiation causes stress, its application in low doses of power or for a short time causes the effect of stimulating germination. Microwave pretreatment improves seed germination, germination energy and seedling growth. The action of microwave radiation changes the chemical composition of seeds, activates the synthesis of enzymes, contributing to their better germination. The most promising direction of research is the experimental determination of such parameters of seed pre-sowing treatment with microwave radiation, which simultaneously provide both their disinfection and stimulation of germination and the subsequent resistance of agricultural plants to abiological stress.

Key words: seeds, pre-sowing treatment, microwave radiation, germination, stimulation of seed germination, disinfection, stress.

Citation. Bakhchevnikov O. N., Braginets A. V. Application of microwave radiation for seed pre-sowing treatment (review). *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023. 3(71). 509-526 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-51.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.547.1:631.53.027.3

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ
ОБРАБОТКИ СЕМЯН (ОБЗОР)

О. Н. Бахчевников, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

А. В. Брагинец, кандидат технических наук, научный сотрудник

*ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»
г. Зерноград, Российская Федерация*

Актуальность. Одним из эффективных физических способов предпосевной обработки семян является воздействие микроволнового электромагнитного излучения. **Цель исследования** – обзор и критический анализ научных публикаций, посвященных применению микроволнового излучения для предпосевной обработки семян с целью определения перспектив его использования в сельском хозяйстве. **Материалы и методы.** Выполнен обзор научной литературы по заявленной теме за 2013-2023 гг. Выполнение исследования состояло из следующих этапов: поиск научной литературы, ее оценка и отбор, синтез данных и их анализ. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что, хотя интенсивная обработка семян микроволновым излучением вызывает стресс, его применение в малых дозах мощности или в течение короткого времени вызывает эффект стимулирования

прорастания. Предпосевная обработка микроволновым излучением улучшает всхожесть семян, энергию прорастания и рост проростков. Действие микроволнового излучения изменяет химический состав семян растений, активирует в них синтез ферментов, способствуя их лучшему прорастанию. **Выводы.** Наиболее перспективным направлением исследований предпосевной обработки семян микроволновым излучением является экспериментальное определение таких параметров, которые одновременно обеспечат как стимулирование их прорастания, так и обеззараживание, а возможно, и последующую устойчивость сельскохозяйственных растений к абиогенным стрессам.

Ключевые слова: предпосевная обработка семян, микроволновое излучение, всхожесть, стимулирование прорастания семян, обеззараживание семян.

Цитирование. Бахчевников О. Н., Брагинец А. В. Применение микроволнового излучения для предпосевной обработки семян (обзор). *Известия НВ АУК*. 2023. 3(71). 509-526. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-51.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Важной операцией в растениеводстве является предпосевная обработка семян с целью улучшения их всхожести, синхронизации прорастания, а также ускорения роста проростков [2, 13, 36].

Прорастание семян растений включает в себя ряд сложных физиологических и биохимических процессов, на которые влияют внешние факторы [55]. Известно, что некоторые способы нетепловой обработки, такие как ионизирующие и неионизирующие излучения, ультразвук и магнитное поле, могут быть использованы для стимулирования физиологических и биохимических изменений в семенах, улучшая их всхожесть и показатели роста [42]. Эти же способы обработки могут быть использованы и для обеззараживания семян, т.е. уничтожения патогенной микрофлоры [64].

Растения испытывают абиотические стрессы не только в фазе семян и ростков, но и в продолжение всего вегетативного цикла. В тоже время установлено, что зачатую растения, испытавшие воздействие малой дозы стресса (эустресс) в фазе семян, приобретают устойчивость, позволяющую им в процессе вегетации эффективно противостоять стрессу [56, 59]. Имеются данные, что предпосевная обработка семян физическими стрессорами формирует у растений устойчивость к абиотическим стрессам [42]. Однако явление повышения стрессоустойчивости растений в результате физического воздействия на их семена еще в достаточной мере не изучено.

Одним из изучаемых физических способов предпосевной обработки семян является воздействие на них микроволнового электромагнитного излучения (частота от 300 МГц до 300 ГГц) [58, 62]. Но уже имеющиеся результаты экспериментальных исследований этого процесса плохо систематизированы [21]. Почти неизученной областью знаний остается возникновение у растений толерантности к абиогенным стрессам после предпосевной обработки семян микроволновым излучением.

Все изложенное определило необходимость выполнения систематического обзора и критического анализа научных статей, посвященных предпосевной обработке семян сельскохозяйственных культур микроволновым излучением, включая СВЧ, для улучшения всхожести и повышения устойчивости к стрессам. В данном обзоре главное внимание уделено результатам действия микроволнового излучения на семена зерновых культур.

Цель исследования: Систематический обзор и критический анализ научных статей, посвященных применению микроволнового излучения для предпосевной обработки семян для определения перспектив его использования в сельском хозяйстве.

Материалы и методы. Работа над настоящим обзором включала следующие этапы: поиск научной литературы, ее отбор, синтез данных и их анализ.

Отбор и систематический обзор научной литературы по избранной теме был выполнен по методике, изложенной в статьях Н. Snyder и R. G. Toracco [48, 54].

Для выбора научных статей на русском и английском языках был выполнен поиск по ключевым словам, приведенным выше, и их сочетаниям в научных библиографических базах «Google Scholar», «eLIBRARY», «Wiley Online Library», MDPI, «Springer Link» и «ScienceDirect». В отобранных статьях были изучены пристатейные списки литературы для выявления дополнительных релевантных источников информации.

В качестве временных рамок для настоящего обзора научных статей был принят период 2013-2023 гг. Научные статьи, опубликованные ранее 2013 г., включены в настоящий обзор при отсутствии более новых публикаций по конкретному аспекту исследуемой темы.

Результаты и обсуждение. *Механизм действия микроволнового излучения на клетки растений.* Микроволновое излучение является частью спектра электромагнитного поля (частота от 300 МГц до 300 ГГц, длина волны от 1 м до 1 мм). Оно считается неионизирующим, т.е. его фотоны не содержат достаточно энергии для ионизации атомов и разрыва химических связей или повреждения ДНК живых организмов. Микроволны (МВ) поглощаются любыми материалами, такими как продукты питания, ткани животных и растений, содержащими воду, вызывая движение ионов внутри клетки, вращение диполя и искажение орбиты электронов, что приводит к быстрому и избирательному (диэлектрическому) нагреву материала [23], вызывая повышение температуры на поверхности и во внутренней части клетки [46, 62] (рис. 1).

Микроволновая энергия преобразуется в тепло в диэлектрическом материале путем воздействия на его полярные молекулы. Полярные молекулы начинают вращаться с частотой, пропорциональной частоте осциллирующего электромагнитного поля. Эти движения вызывают межмолекулярное трение и нагрев материала [52].

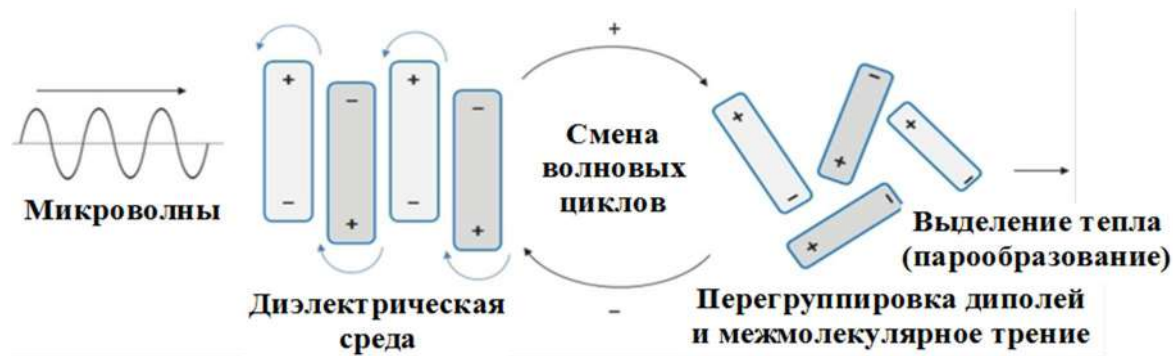


Рисунок 1 – Механизм действия микроволнового излучения на биологические объекты (Sirohi, 2021) [46]

Figure 1 – Mechanism of action of microwave radiation on biological objects (Sirohi, 2021) [46]

Поэтому микроволновое излучение может вызывать различные биологические эффекты в зависимости от напряженности поля, частоты, формы волны, модуляции и продолжительности воздействия [57]. Эти эффекты особенно интенсивно происходят при частоте излучения 2,45 ГГц, когда диэлектрический нагрев происходит в основном за счет поглощения энергии молекулами воды [31].

В настоящее время большинство ученых считает, что поглощенное электромагнитное излучение микроволнового спектра вызывает как тепловые, так и нетепловые эффекты в биологических системах [7, 9, 10].

При взаимодействии с тканями растений микроволновое излучение изменяет плотность электрического заряда на поверхности клеточных мембран и разность потенциалов по обе их стороны, по причине чего меняется активность ионных каналов, что способствует физиологическим изменениям в растениях [58]. В результате поглощения семенами растений энергии микроволн внутренняя температура быстро повышается, приводя к увеличению давления внутри клетки [62]. При достижении определенного значения давление внутри клетки разрывает клеточную стенку, что приводит к вытеканию ее жидких компонентов [29]. Разрушая структуру мембран растительных клеток, МВ-излучение увеличивает способность внутриклеточных растворимых веществ проникать в межклеточное пространство и в другие клетки растения.

Исследования S. B. Kouchebagh показали, что полярные молекулы в растительных клетках поглощают электромагнитную энергию, тем самым изменяя биологическую макромолекулярную структуру и влияя на физиологические и биохимические характеристики клеток [29].

A. Anand установил, что действие МВ-излучения может уменьшать диэлектрическую проницаемость и увеличивать электропроводность клеточных мембран растений [6].

D. X. Wang отмечает, что многие эффекты действия МВ-излучения на клетки растений могут быть обусловлены молекулярным резонансом [60]. Предполагается, что низкочастотное МВ-излучение поглощается на молекулярном уровне, особенно молекулами воды в растительных клетках, и затем проявляется через изменения в колебательной энергии молекул [15]. Резонансные частоты клеточной мембраны биологических объектов лежат в диапазоне миллиметровых волн, поэтому вызванные ими движения молекул инициируют резонанс при вибрации клеточной мембраны и могут оказывать положительное влияние на поглощение воды и другие биохимические процессы в клетках растений [5, 65]. Показано, что действие микроволнового СВЧ-излучения способствует движению молекул воды и тем самым усиливает ее потребление зародышем семени [62].

Таким образом, микроволновое излучение активирует различные физические и биохимические процессы в растительных клетках, что способствует нарушению состояния покоя семян и их прорастанию.

Микроволновое излучение, воздействуя на семена растений, вызывает различные эффекты (рисунок 2), рассмотренные ниже.

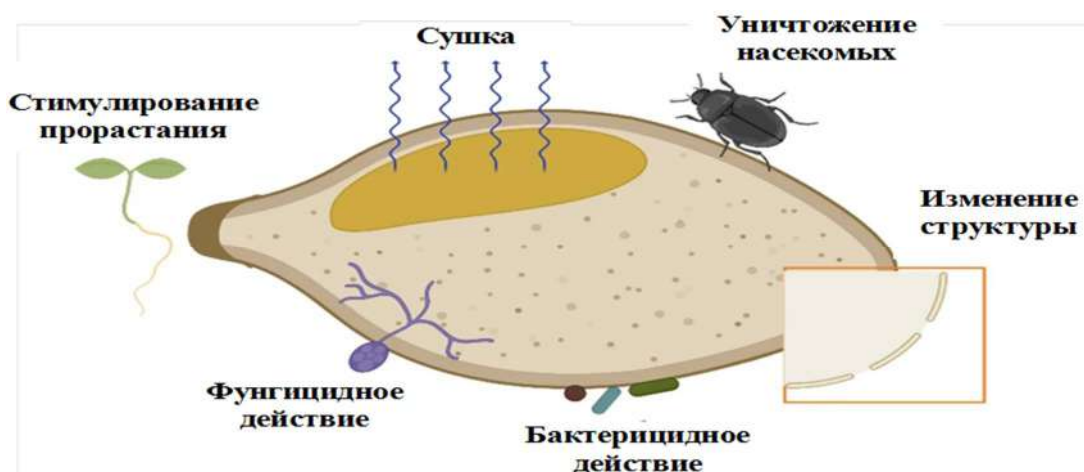


Рисунок 2 – Различные эффекты в результате обработки семян растений микроволновым излучением (S. Taheri, 2022) [52]

Figure 2 – Various effects as a result of treating seeds of plants by microwave radiation (S. Taheri, 2022) [52]

Влияние микроволнового излучения на прорастание семян растений. Большинство из опубликованных исследований описывает результаты воздействия на семена растений микроволнового излучения СВЧ-диапазона частотой 2,45 ГГц. Хотя действие излучения частотой 2,45 ГГц не всегда оказывает явное положительное влияние на прорастание семян, в большинстве экспериментов оно благоприятно влияло на рост проростков и накопление биомассы у различных видов растений [25, 53]. Было установлено, что для каждого вида растений имеется пороговый уровень значений параметров микроволнового излучения и продолжительности его действия, превышение которого вызывает ухудшение прорастания семян и жизнеспособности проростков [53].

Ниже приведены краткие результаты некоторых исследований по обработке семян микроволновым излучением частотой 2,45 ГГц. По данным А. Aladjadjian при обработке семян чечевицы (*Lens culinaris*) не наблюдалось изменений в скорости прорастания, а при длительной обработке наблюдалось негативное воздействие [5]. И. И. Шамгунов и А. В. Степура изучали эффективность облучения семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) излучением частотой 2,45 ГГц и установили, что в результате имел место значительный прирост биомассы их проростков [3]. А. А. Гаврилова сообщила о повышении энергии прорастания семян ячменя (*Hordeum vulgare* L.) после действия излучения частотой 2,45 ГГц на 14,1-35,1 % [1].

D. Talei установил, что воздействие микроволнового излучения привело к увеличению длины корня, длины побега и всхожести семян риса (*Oriza sativa* L.) до 100% при обработке на частоте 2450 МГц в течение 10 ч [53]. Н.Ф. Maswada установил, что обработка семян пшеницы излучением частотой 2,45 МГц и мощностью 700 Вт улучшила поглощение ими воды [33]. В то же время в опытах М. V. Reddy было продемонстрировано снижение жизнеспособности обработанных излучением частотой 2,45 ГГц семян пшеницы [40]. S. K. Lazim сравнивал результаты обработки семян ячменя излучением 2,45 ГГц различной продолжительности и установил, что наилучшая всхожесть наблюдалась после обработки в течение 10 с [30]. С. Iuliana также сообщает о эффективности обработки семян ячменя в течение 20 с при мощности 400 Вт [23].

T. Jakubowski сообщил об увеличении всхожести и энергии прорастания семян фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.) после 10 с воздействия микроволн частотой 2,45 ГГц и мощностью 100 Вт [26]. Однако 60 с такого воздействия оказали негативное влияние на массу проростков.

Интересное исследование провел А. М. Abu-Elsaoud. Он сравнивал результаты воздействия СВЧ-излучения частотой 2,45 ГГц на семена различных сортов пшеницы, культивируемых в Египте, и установил, что существуют статистически значимые различия в их реакции на обработку [4]. Таким образом, при определении параметров предпосевной обработки семян необходимо учитывать не только видовые, но и сортовые различия.

В результате предпосевной обработки семян микроволновым излучением с другими значениями частоты также наблюдались как положительные, так и отрицательные эффекты.

I. Gaurilcikiene сообщает, что обработка семян пшеницы микроволновым излучением повысила урожайность зерна, а именно диапазоны 2,6 ГГц в течение 20 минут, 5,7 ГГц в течение 10 минут и 9,3 ГГц в течение 5 и 10 минут вызывали увеличение количества зерен и массы зерна в колосе [17].

V. V. Bezpal'ko обрабатывал семена ячменя и пшеницы излучением частотой в диапазоне 2,4-3,4 ГГц при потребляемой мощности 0,9 кВт на 1 кг семян и при экспозиции 15-20 с. и установил, что эта обработка вызывает повышение энергии прорастания, всхожести семян и урожайности [11].

Е. Iwuala выполнил эксперимент по облучению семян абельмоша (*Abelmoschus esculentus* L.) микроволновым излучением частотой 9,3 ГГц продолжительностью от 10 мин до 14 ч [24]. Эксперимент выявил стимулирующее воздействие микроволн на параметры прорастания. Однако облучение в течение более чем 10 ч привело к снижению параметров прорастания и роста семян.

Можно сделать вывод, что действие микроволнового излучения на прорастание семян зависит от вида растений, частоты и энергии микроволн, продолжительности воздействия. Положительное влияние микроволнового излучения на семена можно объяснить повышением внутри них температуры и усилением движения воды, что ускоряет прорастание [53]. С другой стороны, ингибирующее воздействие на прорастание семян объясняется поглощением ими энергии в результате более высокой мощности и более длительного времени воздействия, что снижает функции клеток и жизнеспособность семян [41].

Влияние микроволнового излучения на химический состав семян растений. Как показали результаты экспериментальных исследований, обработка микроволновым излучением изменяет химический состав семян растений.

Е. А. М. Namada установил, что в результате обработки микроволнами (длина волны 2,85 см, частота 10,525 ГГц в течение 15 мин) в семенах зерновых культур происходит расщепление сахаров [20]. Он предположил, что это мобилизует питательные вещества для развития зародыша, способствуя прорастанию семян. В результате такой обработки увеличивается содержание белков и аминокислот в непроросших семенах пшеницы. Действие микроволн стимулирует синтез пролина, но снижает содержание сахаров, нуклеиновых кислот и фенольных соединений.

По данным Z.B. Qiu, под действием излучения (Qiu, 2013) в семенах пшеницы увеличилось содержание перекиси водорода, аскорбиновой кислоты, глутатиона, каротиноидов и хлорофилла [37].

S.M. Wang сообщает, что обработка МВ-излучением (мощность 600 Вт, продолжительность 30 с) повысила содержание флавоноидов, редуцирующих сахаров и растворимых белков в семенах татарской гречихи (*Fagopyrum tataricum* L.) [61]. А после обработки микроволнами (мощность 800 Вт в течение 10 с) содержание свободных аминокислот в ее ростках через 5 дней достигло 11 мг/г.

По данным Е. Iwuala, действие микроволнового излучения частотой 9,3 ГГц на семена абельмоша в течение 8-10 ч оказало стимулирующее воздействие на накопление флавоноидов, каротиноидов, хлорофиллов, полифенолов, β -каротина, лютеина и белков [23].

Таким образом, обработка микроволновым излучением может изменять химический состав семян растений, способствуя их лучшему прорастанию.

Влияние микроволнового излучения на ферментную активность семян растений. Исследования действия микроволнового излучения на семена показали, что оно стимулирует активность ферментов, способствуя накоплению активных веществ в семенах зерновых культур и их прорастанию [17, 63].

Результаты опытов Z.B. Qiu показали, что микроволновое излучение может повысить активность в клетках семян антиоксидантных ферментов, включая пероксидазу, аскорбатпероксидазу и глутатионпероксидазу [38].

В экспериментах Y.P. Chen была показана связь воздействия излучения и повышения активности α -амилазы в семенах пшеницы [14]. Он установил, что их обработка в течение 5-25 с может увеличить активность α -амилазы, причем самая высокая активность (до 0,88 мг/г·мин⁻¹) была зарегистрирована после обработки в течение 10 с.

По данным X.N. Wu, обработка семян овса (*Avena sativa* L.) МВ-излучением низкой мощности способствует повышению активности нитратредуктазы и глутаминсинтетазы в листьях ростков и ингибирует активность протеолитических ферментов и рибонуклеазы [63].

По данным E. Iwuola, действие микроволнового излучения частотой 9,3 ГГц на семена абельмоша привело к увеличению концентрации фермента β -1,3-глюканазы, что усилило рост корня [23].

Таким образом, обработка микроволновым излучением может эффективно активировать различные ферменты в семенах, способствуя их прорастанию и лучшему росту проростков.

Негативное стрессовое воздействие микроволнового излучения на семена растений. Несмотря на то, что микроволновое излучение не является ионизирующим, его действие на семена растений может быть негативным, так как инициированные им тепловые эффекты приводят к денатурации белков, разрушению ферментов и нуклеиновых кислот [45]. Сообщается, что обработка микроволнами оказывает неблагоприятное воздействие на прорастание семян и может привести к снижению их качества [16, 51]. По мнению S. Taheri, негативный эффект действия микроволн частично обусловлен неравномерным нагревом из-за разницы температур холодных и горячих участков семян [51]. Поскольку микроволны работают на основе диэлектрического эффекта (рисунок 1), они нагревают только участки, содержащие диэлектрические жидкости (воду), вызывая образование горячих точек, что и приводит к неравномерному нагреву (рисунок 3).

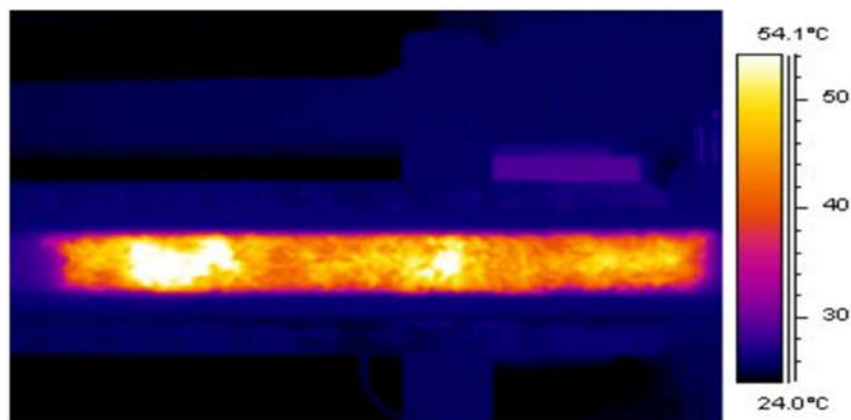


Рисунок 3 – Типичная термограмма семян пшеницы после обработки микроволновым излучением (A. Manickavasagan, 2007) [32]

Figure 3 – Typical thermogram of wheat seeds after treatment microwave radiation (A. Manickavasagan, 2007) [32]

Исправить этот недостаток возможно путем оптимизации равномерности излучения [52] и перемешивания семян [66]. В тоже время S. Gunasekaran и H. Yang пришли к выводу о том, что импульсный микроволновый нагрев привел к более равномерному распределению температуры в образцах семян, чем непрерывный нагрев [18].

Поэтому предварительно необходимо определять безопасные значения параметров излучения и продолжительности обработки семян.

Y.P. Chen исследовал действие излучения мощностью 80-100 кВт и частотой 2,6, 5,7 и 9,3 ГГц в течение 5, 10 и 20 мин на семена пшеницы [14]. Им было установлено, что действие такого излучения не оказало существенного влияния на энергию прорастания и всхожесть семян. Но в тоже время количество аномально проросших семян

увеличилось, а индекс всхожести (mean germination index – GI) и индекс прорастания (visibly sprouted seeds – VI) снизились. При этом негативное влияние излучения на семена увеличивалось с повышением их влажности.

В результате экспериментов D.X. Wang установил, что обработка семян пшеницы излучением мощностью 800 Вт в течение 20 и 25 с значительно снизила скорость прорастания и жизнеспособность семян [60]. D.X. Wang также определил, что степень воздействия излучения зависит от влажности семян. Они сделали вывод, что более высокая мощность излучения и более длительное время обработки приводят к более высокой энергии поглощения молекул, что может нарушить функции и физиологический баланс клеток семян злаков.

Ингибирующий эффект излучения частотой 10,5 и 12,5 ГГц на скорость прорастания у семян редиса (*Raphanus sativus*) был зафиксирован в опытах A. Scialabba и C. Tamburello [44]. H. Sahin сообщает, что воздействие излучения мощностью 2,8 кВт подавляло прорастание семян сорняков до 100% из-за значительного теплового эффекта [43]. A. Radzevicius установил, что в результате воздействия микроволнового излучения частотой 9,3 ГГц семена редиса и моркови (*Daucus sativus*) прорастали более медленно, у них уменьшилась энергия прорастания [39].

Частота микроволнового излучения, судя по всему, не является определяющей для эффективности обработки, так как имеются данные о негативном влиянии на семена как низкочастотного, так и высокочастотного излучения. О негативном влиянии низкочастотного излучения свидетельствует снижение скорости поглощения воды у семян бобов мунг (*Vigna radiata*) [22], снижение всхожести у подорожника (*Plantago media* L.) [47] и снижение гидратации у озимой пшеницы [49]. Негативное влияние высокочастотного излучения демонстрируют факты уменьшения поглощения воды семенами моркови и редиса (частота 10,5 и 12,5 ГГц) [39] и значительное снижение жизнеспособности семян огурца многоплодного (*Cucumis tyriocarpus*) при частоте 2,5 ГГц [12].

Содержание влаги является очень важным фактором, который необходимо учитывать при микроволновой обработке семян. Сообщается, что при увеличении содержания влаги в зернах пшеницы и сорго негативное воздействие микроволновой обработки на всхожесть и энергичность может усилиться [8, 17]. Поэтому предпосевную обработку семян для повышения всхожести предпочтительнее проводить при низкой влажности.

Таким образом, обработка семян растений микроволновым излучением, мощность и время действия которого превышают пороговые значения, а также обработка влажных семян приводят к снижению их всхожести и жизнеспособности, что необходимо учитывать при предпосевной обработке.

Обеззараживание семян микроволновым излучением. Как было показано выше, воздействие микроволнового излучения приводит к разрушению органических веществ в составе клеток живых организмов [45]. Это свойство микроволнового излучения используется для уничтожения патогенных грибов и бактерий, поражающих семена.

Предполагается, что механизм ингибирующего действия МВ-излучения на микроорганизмы основан на нагреве внутриклеточной среды, что приводит к денатурации белков, ферментов и нуклеиновых кислот [45]. Это может привести к повреждению семян и снижению их всхожести. Но сообщается, что при оптимизированных параметрах обработки рост микроорганизмов на семенах зерновых культур может быть полностью подавлен без ущерба для качества их прорастания [21]. Эта задача может быть облегчена тем, что диэлектрические свойства клеток растений и микроорганизмов различны (Yadav, 2014) [64].

М. Schmidt установил, что обработка семян зерновых культур с помощью МВ-излучения (продолжительность 120 с, частота 2450 МГц, 1,25 кВт) может эффективно подавлять рост и прорастание спор грибов *Aspergillus spp.*, продуцирующих афлатоксин [45]. Но при этом происходит значительное снижение всхожести семян, поэтому М. Schmidt сделал вывод, что этот вид предпосевной обработки плохо подходит для зерновых культур.

Однако другие ученые сообщают о хороших результатах обработки семян микроволновым излучением, сочетающих эффективное обеззараживание с хорошей всхожестью, что можно объяснить правильно подобранными параметрами излучения.

В частности, установлено, что маломощное МВ-излучение 160-640 Вт частотой 2,6, 5,7 и 9,3 ГГц в течение 10 и 20 мин приводит к гибели патогенных микроорганизмов, поражающих семена пшеницы [17].

По данным М.В. Reddy зараженность семян пшеницы грибом *Fusarium graminearum* после облучения снизилась с 36 до 7%, но при этом всхожесть семян не уменьшилась ниже 85% [40].

О.Г. Кнох сообщает, что в результате обработки семян пшеницы излучением (частота 2450 МГц, мощность 800 Вт, время 15, 30 и 45 с) значительно снизилось содержание грибов *Fusarium spp.* и *Microdochium nivale* [28].

Установлено, что увеличение мощности микроволн и температуры обработки, а также ее продолжительности может повысить эффективность обеззараживания [19]. Также важную роль в эффективности обеззараживания играет доза микроволнового излучения, по достижении определенного уровня которой инактивируются все микроорганизмы [64].

Содержание влаги в семенах играет важную роль при обеззараживании с помощью микроволн [46]. Увеличение содержания влаги во внешнем слое зерна по сравнению с внутренним приводит к интенсивному нагреву, что усиливает эффективность дезинфекции [64].

Содержание влаги играет большую роль в выживании патогенных грибов в семенах зерновых культур, а также в их восприимчивости к действию излучения – обработка излучением при более высокой влажности более эффективна [27]. Но следует учитывать, что более высокая влажность делает семена более уязвимыми для негативного действия микроволнового излучения [52].

Анализ результатов исследований показывает, что более высокая мощность излучения, большее время воздействия и более высокое содержание влаги приводят к повышению температуры, что увеличивает гибель бактерий и грибов, но может негативно влиять на всхожесть семян [50, 52]. Каждый вид микроорганизмов может быть уничтожен при определенной температуре и влажности. Эта температура может быть достигнута путем поглощения определенного количества микроволновой энергии, что соответствует определенной мощности микроволн и продолжительности воздействия.

Таким образом, обработка микроволновым излучением является эффективным средством обеззараживания семян перед посевом, но его применение для этих целей осложнено тем, что интенсивное действие излучения приводит к нагреву растительных тканей и их повреждению, что снижает всхожесть. Поэтому необходимо подбирать такие параметры обработки излучением, которые нарушают жизнеспособность патогенных микроорганизмов, не повреждая клетки семян растений.

Повышение устойчивости растений к стрессам под действием обработки семян микроволновым излучением. Неионизирующее микроволновое излучение является экологическим фактором, способным вызывать специфические реакции у растений, ко-

торые во многом схожи с теми, что наблюдаются после стрессового воздействия [10, 21]. Имеется небольшое количество научных статей, в которых сообщается о повышении устойчивости растений к абиотическим стрессам после обработки их семян микроволновым излучением.

Данные исследований Z.B. Qiu показывают, что действие МВ-излучения может улучшить метаболизм растений в условиях кадмиевого стресса, повышая устойчивость к кадмию у проростков пшеницы и увеличивая антиоксидантную активность в ее семенах [38].

Y. P. Chen установил, что облучение микроволнами повышает способность проростков пшеницы поглощать свободные радикалы, образовавшиеся под действием солевого осмотического стресса, тем самым повышая устойчивость к нему [14].

A. Vian установил, что низкоамплитудное короткодействующее излучение частотой 900 МГц вызывает накопление в клетках растений томата (*Lycopersicon esculentum*) мРНК, кодирующей связанный со стрессом транскрипционный фактор bZIP [57]. Быстрота и амплитуда реакции растения были сравнимы с теми, которые наблюдаются после сильной внешней стимуляции, такой как действие огня. Он сделал вывод, что высокочастотное низкоамплитудное МВ-излучение вызывает усиленную экспрессию по крайней мере одного гена, связанного с устойчивостью к стрессам.

Предполагается, что антистрессовый эффект обработки семян микроволновым излучением основан на трех механизмах [62]. Во-первых, обработка усиливает активность ферментов каталаза, пероксидаза и супероксиддисмутаза, которые считаются ключевыми в противодействии абиотическим стрессам. Во-вторых, повышается концентрация глутатиона и аскорбиновой кислоты, которые могут устранять свободные радикалы и уменьшать окислительный стресс. В-третьих, МВ-излучение увеличивает концентрацию оксида азота (NO), который может реагировать со свободными радикалами, уменьшая их разрушительное действие.

Заключение. Анализ результатов исследований показывает, что хотя интенсивная обработка семян растений микроволновым излучением вызывает стресс, обработка им в низких дозах мощности или в течение короткого времени вызывает эффект прайминга (стимулирования). Это соответствует предусмотренной теорией гормезиса двухфазной реакции на внешний фактор, характеризующейся стимулирующим эффектом при малых дозах, но ингибирующим при больших дозах того же агента [34]. Таким образом, использование горметических эффектов действия микроволнового излучения для стимулирования прорастания семян сельскохозяйственных культур, появления всходов и укоренения растений является перспективным подходом.

Установлено, что предпосевная обработка микроволновым излучением улучшает всхожесть семян, энергию прорастания и рост проростков. Действие излучения изменяет химический состав семян растений, активизирует в них синтез ферментов, способствуя их лучшему прорастанию.

Для разработки процесса предпосевной обработки микроволновым излучением с целью повышения всхожести семян необходимо учитывать поглощаемую ими мощность, конечную температуру, а также содержание влаги. Для каждого вида семян, в зависимости от размера и свойств их семенной оболочки, существует определенный уровень микроволновой мощности и конечной температуры, способный нарушить состояние покоя и повысить жизнеспособность. Но после достижения определенного порога излучения на зародыш семени будет оказываться негативное воздействие, что приведет к потере его жизнеспособности и повреждению.

Две основные проблемы, связанные с микроволновой обработкой семян – это неравномерный нагрев и негативное воздействие на всхожесть. Неравномерность нагрева может быть устранена путем псевдоожижения слоя семян с помощью горячего воздуха или механического перемешивания. Контроль температуры поверхности семян путем непрерывного изменения мощности микроволн во время обработки также является способом предотвращения перегрева и негативных последствий.

Улучшая равномерность нагрева и контролируя температуру поверхности, можно контролировать температуру горячей точки, чтобы она не повышалась выше допустимого предела, что предотвратит негативное влияние на качественные характеристики семян.

Другим важным фактом при использовании микроволновой обработки семян является оптимизация параметров процесса для достижения наибольшей энергоэффективности. Эти параметры включают мощность излучения, продолжительность обработки и содержание влаги в семенах.

Наиболее перспективным направлением исследований является экспериментальное определение таких параметров предпосевной обработки семян микроволновым излучением, которые одновременно обеспечат как стимулирование их прорастания, так и обеззараживание, а возможно, в последующем и устойчивость сельскохозяйственных растений к абиогенным стрессам.

Conclusions. Analysis of research results shows that although intensive treatment of plant seeds with microwave radiation causes stress, treatment with low power doses or for a short time causes a priming (stimulation) effect. This corresponds to the two-phase response to an external factor envisaged by the theory of hormesis, characterized by a stimulating effect at low doses, but an inhibitory effect at large doses of the same agent [34]. Thus, the use of hormetic effects of microwave radiation to stimulate the germination of crop seeds, emergence and rooting of plants is a promising approach.

It has been established that pre-sowing treatment with microwave radiation improves seed germination, germination energy and seedling growth. The effect of radiation changes the chemical composition of plant seeds, activates the synthesis of enzymes in them, promoting their better germination.

To develop a process for pre-sowing treatment with microwave radiation in order to increase seed germination, it is necessary to take into account the power they absorb, the final temperature, and the moisture content. For each type of seed, depending on the size and properties of its seed coat, there is a certain level of microwave power and final temperature that can break dormancy and increase viability. But after reaching a certain radiation threshold, the seed embryo will be negatively affected, which will lead to loss of viability and damage.

The two main problems associated with microwave seed treatment are uneven heating and negative effects on germination. Uneven heating can be eliminated by fluidizing the seed layer using hot air or mechanical agitation. Controlling seed surface temperature by continuously varying the microwave power during processing is also a way to prevent overheating and negative effects.

By improving heating uniformity and controlling surface temperature, the hot spot temperature can be controlled so that it does not rise above the acceptable limit, which will prevent negative impact on the quality characteristics of the seeds.

Another important fact when using microwave seed treatment is the optimization of process parameters to achieve the greatest energy efficiency. These parameters include irradiation power, treatment duration and seed moisture content.

The most promising direction of research is the experimental determination of such parameters of pre-sowing treatment of seeds with microwave radiation, which will simultaneously provide both stimulation of their germination and disinfection, and possibly subsequently the resistance of agricultural plants to abiotic stress.

Библиографический список

1. Гаврилова А. А., Филатов Д. А., Казаков А. В. Влияние СВЧ облучения на прорастание семян ячменя // Сельский механизатор. 2020. № 4. С. 18-19.
2. Моисеева К. В., Сафонова Л. А. Эффективность предпосевного обеззараживания семян яровой пшеницы // Агропродовольственная политика России. 2017. № 9. С. 56-59.
3. Шамгунов И. И., Степура А. В. Исследование влияния предпосевного СВЧ воздействия на морфологические показатели прорастающих семян яровой пшеницы // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. С. 85-91.

4. Abu-Elsaoud A. M. Effect of microwave electromagnetic radio frequency on germination and seedling growth consequences of six wheat *Triticum aestivum* L. cultivars // Advances in Environmental Biology. 2015. Vol. 9. No 24. Pp. 270-280.
5. Aladjadjiyan A. Influence of microwave irradiation on some vitality indices and electroconductivity of ornamental perennial crops // Journal of Central European Agriculture. 2002. Vol. 3. No 4. Pp. 271-276.
6. Anand A., Nagarajan S., Joshi D. K., Verma A. P. S., Kar A. Microwave seed treatment reduces hardseededness in *Stylosanthes seabra* and promotes redistribution of cellular water as studied by NMR relaxation measurements // Seed Science and Technology. 2009. Vol. 37. Pp. 88-97.
7. Araujo S. D. S., Paparella S., Dondi D. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology // Frontiers in Plant Science. 2016. Vol. 7. P. 646.
8. Atmaca S., Akdag Z., Dasdag S., Celik S. Effect of microwaves on survival of some bacterial strains // Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica. 1995. Vol. 43. No 4. Pp. 371-378.
9. Banik S. Bandyopadhyay S., Ganguly S. Bioeffects of microwave – a brief review // Biore-source Technology. 2003. Vol. 87. No 2. Pp. 155-159.
10. Bera K., Dutta P., Sadhukhan S. Seed priming with non-ionizing physical agents: Plant responses and underlying physiological mechanisms // Plant Cell Reports. 2022. Vol. 41. No 1. Pp. 53-73.
11. Bezpalko V. V., Zhukova L. V., Stankevych S. V. Ecologically safe methods for presowing treatment of cereal seeds // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9. No 3. Pp. 189-197.
12. Brodie G., Ryan C., Lancaster C. The effect of microwave radiation on prickly paddy melon (*Cucumis myriocarpus*) // International Journal of Agronomy. 2012. Vol. 10. P. 287608.
13. Carrera-Castano G., Calleja-Cabrera J., Pernas M. An updated overview on the regulation of seed germination // Plants. 2020. Vol. 9. No 6. P. 703.
14. Chen Y. P., Jia J. F., Han X. L. Weak microwave can alleviate water deficit induced by osmotic stress in wheat seedlings // Planta. 2009. Vol. 229. Pp. 291-298.
15. Cretescu I., Caprita R. Response of barley seedlings to microwaves at 2.45 GHz // Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies. 2013. Vol. 46. No 1. Pp. 185-191.
16. Dalmoro A. On the relevance of thermophysical characterization in the microwave treatment of legumes // Food & Function. 2018. Vol. 9. No 3. Pp. 1816-1828.
17. Gaurilcikiene I. The effect of strong microwave electric field radiation on: (2) wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and sanitation // Zemdirbyste-Agriculture. 2013. Vol. 100. Pp. 185-190.
18. Gunasekaran S., Yang H. Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. Pp. 1452-1456.
19. Guo Q. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 67. Pp. 236-247.
20. Hamada E. A. M. Effects of microwave treatment on growth, photosynthetic pigments and some metabolites of wheat // Biologia Plantarum. 2007. Vol. 51. Pp. 343-345.
21. Haque N., Agrawal A., Pati A. K. A Mini Review on effects of Microwave on Seed Germination // Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2023. Vol. 15. No 1. Pp. 82-86.
22. Huang H.-H., Wang S.-R. The effects of inverter magnetic fields on early seed germination of mung beans // Bioelectromagnetics. 2008. Vol. 29. Pp. 649-657.
23. Iuliana C. Response of barley seedlings to microwaves at 2.45 GHz // Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies. 2013. Vol. 46. No 1. Pp. 185-191.
24. Impact of controlled microwave radiation in enhancing the productivity of *Abelmoschus esculentus* seedlings (L.) Moench / E. Iwuala [et al.] // Journal of Plant Interactions. 2021. Vol. 16. No 1. Pp. 179-186.
25. Jakubowski T. The impact of microwave radiation at different frequencies on the weight of seed potato germs and crop of potato tubers // Agricultural Engineering. 2010. Vol. 6. No 124. Pp. 57-64.

26. Jakubowski T. Evaluation of the impact of pre-sowing microwave stimulation of bean seeds on the germination process // *Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 19. No 2. Pp. 45-56.
27. Jiao S., Zhong Y., Deng Y. Hot air-assisted radio frequency heating effects on wheat and corn seeds: quality change and fungi inhibition // *Journal of Stored Products Research*. 2016. Vol. 69. Pp. 265-271.
28. Knox O. G., McHugh M., Fountaine J. M., Havis N. D. Effects of microwaves on fungal pathogens of wheat seed // *Crop Protection*. 2013. Vol. 50. Pp. 12-16.
29. Kouchebagh S. B., Rasouli P., Babaiy A. H., Reza A. Seed germination of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) as affected by physical priming techniques // *International Journal of Biosciences*. 2015. Vol. 6. Pp. 49-54.
30. Lazim S. K., Ramadhan M. N. Effect of microwave and UV-C radiation on some germination parameters of barley seed using mathematical models of Gompertz and logistic: Analysis study // *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 33. No 2. Pp. 28-41.
31. Lew A., Krutzik P. O., Hart M. E., Chamberlin A. R. Increasing rates of reaction: microwave-assisted organic synthesis for combinatorial chemistry // *Journal of Combinatorial Chemistry*. 2002. Vol. 4. No 2. Pp. 95-105.
32. Manickavasagan A., Jayas D. S., White N. D. G. Germination of wheat grains from uneven microwave heating in an industrial microwave dryer // *Canadian Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 49. P. 3.
33. Maswada H. F., Sunoj V. S. J., Prasad P. V. V. A comparative study on the effect of seed pre-sowing treatments with microwave radiation and salicylic acid in alleviating the drought-induced damage in wheat // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2021. Vol. 40. Pp. 48-66.
34. Mattson M. P. Hormesis defined // *Ageing Research Reviews*. 2008. Vol. 7. No 1. P. 1-7.
35. Nalwa C., Seth M. Physiology of Seed Dormancy and Germination - A Review // *Journal of Pharmaceutical Research International*. 2021. Vol. 33. No 58A. Pp. 557-562.
36. Paparella S., Araújo S. S., Rossi G. Seed priming: state of the art and new perspectives // *Plant Cell Reports*. 2015. Vol. 34. Pp. 1281-1293.
37. Qiu Z. B., Guo J. L. Nitric oxide acts as a signal molecule in microwave pretreatment induced cadmium tolerance in wheat seedlings // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013. Vol. 35. P. 65-73.
38. Qiu Z. B., Zhang M. M., Guo J. L., Lei M. Y. Role of nitric oxide in improving cadmium tolerance of microwave-pretreated wheat seedlings // *Chinese Journal of Ecology (Sheng Tai Xue Za Zhi)*. 2013. Vol. 32. Pp. 1794-1799.
39. Radzevičius A. The effect of strong microwave electric field radiation on: (1) vegetable seed germination and seedling growth rate // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2013. Vol. 100. Pp. 179-184.
40. Reddy M. V. B., Raghavan G. S. V., Kushalappa A. C., Paulitz T. C. Effect of microwave treatment on quality of wheat seeds with *Fusarium graminearum* // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998. Vol. 71. No 2. Pp. 113-117.
41. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. Pp. 95-108.
42. Romero-Galindo R. Biophysical methods used to generate tolerance to drought stress in seeds and plants: a review // *International Agrophysics*. 2022. Vol. 35. No. 4. Pp. 389-410.
43. Sahin H. Effects of microwaves on the germination of weed seeds // *Journal of Biosystems Engineering*. 2014. Vol. 39. Pp. 304-309.
44. Scialabba A., Tamburello C. Microwave effects on germination and growth of radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings // *Acta Botanica Gallica*. 2002. Vol. 149. No 2. Pp. 113-123.
45. Schmidt M., Zannini E., Arendt E. Recent advances in physical post-harvest treatments for shelf-life extension of cereal crops // *Foods*. 2018. Vol. 7. P. 45.
46. Sirohi R., Tarafdar A. Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward // *Food Research International*. 2021. Vol. 145. P. 110396.
47. Shashurin M. M. Physiological responses of Plantago media to electromagnetic field of power-line frequency (50 Hz) // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2014. Vol. 61. No 4. P. 484-488.

48. Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines // Journal of Business Research. 2019. Vol. 104. Pp. 333-339.
49. Sukiasyan A., Mikaelyan Y., Ayrapetyan S. Comparative study of non-ionizing and ionizing radiation effect on hydration of winter wheat seeds in metabolic active and inactive states // The Environmentalist. 2012. Vol. 32. No 2. Pp. 188-192.
50. Taheri S., Brodie G., Jacob M. V., Antunes E. Dielectric properties of chickpea, red and green lentil in the microwave frequency range as a function of temperature and moisture content // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2018. Vol. 52. No 3. Pp. 198-214.
51. 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-Food Science and Technology. 2020. Vol. 129. P. 109534.
52. Taheri S., Brodie G.I., Gupta D. Microwave Heating for Grain Treatment // Agritech: Innovative Agriculture Using Microwaves and Plasmas. 2022. Springer, Singapore. Pp. 165-197.
53. Talei D., Valdiani A., Maziah M., Mohsenkhah M. Germination response of MR 219 rice variety to different exposure times and periods of 2450 MHz microwave frequency // The Scientific World Journal. 2013. P. 408026.
54. Torracio R. J. Writing integrative reviews of the literature: Methods and purposes // International Journal of Adult Vocational Education and Technology (IJAVET). 2016. Vol. 7. No 3. Pp. 62-70.
55. Tuan P. A., Kumar R., Rehal P. K., Toora P. K., Ayele B. T. Molecular mechanisms underlying abscisic acid/gibberellin balance in the control of seed dormancy and germination in cereals // Frontiers in Plant Science. 2018. Vol. 9. Pp. 668-681.
56. Vázquez-Hernández M. C., Parola-Contreras I., Montoya-Gómez L. M. Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 250. Pp. 223-229.
57. Vian A., Roux D., Girard S. Microwave irradiation affects gene expression in plants // Plant Signaling & Behavior. 2006. Vol. 1. No 2. Pp. 67-70.
58. Vian A., Davies E., Gendraud M., Bonnet P. Plant responses to high frequency electromagnetic fields // BioMed research international. 2016. Pp. 1-13.
59. Villagómez-Aranda A. L. Activating stress memory: Eustressors as potential tools for plant breeding // Plant Cell Reports. 2022. Vol. 41. No. 7. Pp. 1481-1498.
60. Wang D. X., Liu Y. Lethal effects of microwave treatment on *Sitophilus oryzae* Linnaeus and germination rate of wheat // Journal of Nuclear Agricultural Sciences. 2011. Vol. 25. No 1. Pp. 105-109.
61. Wang S. M., Wang J. F., Guo Y. B. Microwave irradiation enhances the germination rate of tartary buckwheat and content of some compounds in its sprouts // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. 2018. Vol. 68. Pp. 195-205.
62. Wang J., Ma H., Wang S. Application of ultrasound, microwaves, and magnetic fields techniques in the germination of cereals // Food Science and Technology Research. 2019. Vol. 25. No 4. Pp. 489-497.
63. Wu X. H., Luo G. Q., Feng J. M. Effects of microwave treatment on the nitrogen metabolism of oat seedlings under Na₂CO₃ stress // J. Microwaves (Wei Bo Xue Bao). 2017. Vol. 33. P. 91-96.
64. Yadav D. N., Anand T., Sharma M., Gupta R. K. Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview // Journal of Food Science and Technology. 2014. Vol. 51. Pp. 3568-3576.
65. Yanenko A. F., Matsibura A. P., Peregodov S. N., Uniyaka T. L. Impact of microwave radiation on vegetable biological objects // 14th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Sevastopol, 2004. Pp. 721-722.
66. Ye J., Hong T., Wu Y. Model stirrer based on a multi-material turntable for microwave processing materials // Materials. 2017. Vol. 10. No 2. P. 95.

References

1. Gavrilova A. A., Filatov D. A., Kazakov A. V. The effect of microwave exposure on the germination of barley seeds // Rural machine operator. 2020. № 4. Pp. 18-19.

2. Moiseeva K.V., Safonova L.A. Effectiveness of pre-sowing disinfection of spring wheat seeds//Agri-food policy of Russia. 2017. № 9. Pp. 56-59.
3. Shamgunov I.I., Stepura A.V. Study of the effect of pre-sowing microwave exposure on morphological indicators of germinating seeds of spring wheat//Engineering Bulletin of the Don. 2017. № 2. Pp 85-91.
4. Abu-Elsaoud A. M. Effect of microwave electromagnetic radio frequency on germination and seedling growth consequences of six wheat *Triticum aestivum* L. cul-tivars // Advances in Environmental Biology. 2015. Vol. 9. No 24. Pp. 270-280.
5. Aladjadjyan A. Influence of microwave irradiation on some vitality indices and electro-conductivity of ornamental perennial crops // Journal of Central European Ag-riculture. 2002. Vol. 3. No 4. Pp. 271-276.
6. Anand A., Nagarajan S., Joshi D. K., Verma A. P. S., Kar A. Microwave seed treatment reduces hardseededness in *Stylosanthes seabrana* and promotes redistribu-tion of cellular water as stud-ied by NMR relaxation measurements // Seed Science and Technology. 2009. Vol. 37. Pp. 88-97.
7. Araujo S. D. S., Paparella S., Dondi D. Physical methods for seed invigora-tion: ad-vantages and challenges in seed technology // Frontiers in Plant Science. 2016. Vol. 7. P. 646.
8. Atmaca S., Akdag Z., Dasdag S., Celik S. Effect of microwaves on survival of some bacte-rial strains // Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica. 1995. Vol. 43. No 4. Pp. 371-378.
9. Banik S. Bandyopadhyay S., Ganguly S. Bioeffects of microwave – a brief review // Biore-source Technology. 2003. Vol. 87. No 2. Pp. 155-159.
10. Bera K., Dutta P., Sadhukhan S. Seed priming with non-ionizing physical agents: Plant re-sponses and underlying physiological mechanisms // Plant Cell Reports. 2022. Vol. 41. No 1. Pp. 53-73.
11. Bezpalko V. V., Zhukova L. V., Stankevych S. V. Ecologically safe meth-ods for presowing treatment of cereal seeds // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9. No 3. Pp. 189-197.
12. Brodie G., Ryan C., Lancaster C. The effect of microwave radiation on prickly paddy melon (*Cucumis myriocarpus*) // International Journal of Agronomy. 2012. Vol. 10. P. 287608.
13. Carrera-Castano G., Calleja-Cabrera J., Pernas M. An updated overview on the regulation of seed germination // Plants. 2020. Vol. 9. No 6. P. 703.
14. Chen Y. P., Jia J. F., Han X. L. Weak microwave can alleviate water deficit induced by osmotic stress in wheat seedlings // Planta. 2009. Vol. 229. Pp. 291-298.
15. Cretescu I., Caprita R. Response of barley seedlings to microwaves at 2.45 GHz // Scien-tific Papers: Animal Science & Biotechnologies. 2013. Vol. 46. No 1. Pp. 185-191.
16. Dalmoro A. On the relevance of thermophysical characterization in the mi-crowave treatment of legumes // Food & Function. 2018. Vol. 9. No 3. Pp. 1816-1828.
17. Gaurilcikiene I. The effect of strong microwave electric field radiation on: (2) wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and sanitation // Zemdirbyste-Agriculture. 2013. Vol. 100. Pp. 185-190.
18. Gunasekaran S., Yang H. Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating // Journal of Food Engineer-ing. 2007. Vol. 78. Pp. 1452-1456.
19. Guo Q. Microwave processing techniques and their recent applications in the food indus-try // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 67. Pp. 236-247.
20. Hamada E. A. M. Effects of microwave treatment on growth, photosynthetic pigments and some metabolites of wheat // Biologia Plantarum. 2007. Vol. 51. Pp. 343-345.
21. Haque N., Agrawal A., Pati A. K. A Mini Review on effects of Microwave on Seed Ger-mination // Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2023. Vol. 15. No 1. P. 82-86.
22. Huang H.-H., Wang S.-R. The effects of inverter magnetic fields on early seed germina-tion of mung beans // Bioelectromagnetics. 2008. Vol. 29. Pp. 649-657.
23. Iuliana C. Response of barley seedlings to microwaves at 2.45 GHz // Sci-entific Papers: Animal Science & Biotechnologies. 2013. Vol. 46. No 1. Pp. 185-191.
24. Impact of controlled microwave radiation in enhancing the productivity of *Abelmoschus esculentus* seedlings (L.) Moench / E. Iwuala [et al.] // Journal of Plant In-teractions. 2021. Vol. 16. No 1. Pp. 179-186.

25. Jakubowski T. The impact of microwave radiation at different frequencies on the weight of seed potato germs and crop of potato tubers // *Agricultural Engineering*. 2010. Vol. 6. No 124. P. 57-64.
26. Jakubowski T. Evaluation of the impact of pre-sowing microwave stimulation of bean seeds on the germination process // *Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 19. No 2. P. 45-56.
27. Jiao S., Zhong Y., Deng Y. Hot air-assisted radio frequency heating effects on wheat and corn seeds: quality change and fungi inhibition // *Journal of Stored Products Research*. 2016. Vol. 69. P. 265-271.
28. Knox O. G., McHugh M., Fountaine J. M., Havis N. D. Effects of micro-waves on fungal pathogens of wheat seed // *Crop Protection*. 2013. Vol. 50. P. 12-16.
29. Kouchebagh S. B., Rasouli P., Babaiy A. H., Reza A. Seed germination of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) as affected by physical priming techniques // *International Journal of Biosciences*. 2015. Vol. 6. P. 49-54.
30. Lazim S. K., Ramadhan M. N. Effect of microwave and UV-C radiation on some germination parameters of barley seed using mathematical models of Gompertz and logistic: Analysis study // *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 33. No 2. P. 28-41.
31. Lew A., Krutzik P. O., Hart M. E., Chamberlin A. R. Increasing rates of reaction: microwave-assisted organic synthesis for combinatorial chemistry // *Journal of Combinatorial Chemistry*. 2002. Vol. 4. No 2. P. 95-105.
32. Manickavasagan A., Jayas D. S., White N. D. G. Germination of wheat grains from uneven microwave heating in an industrial microwave dryer // *Canadian Bio-systems Engineering*. 2007. Vol. 49. P. 3.
33. Maswada H. F., Sunoj V. S. J., Prasad P. V. V. A comparative study on the effect of seed pre-sowing treatments with microwave radiation and salicylic acid in alleviating the drought-induced damage in wheat // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2021. Vol. 40. P. 48-66.
34. Mattson M. P. Hormesis defined // *Ageing Research Reviews*. 2008. Vol. 7. No 1. P. 1-7.
35. Nalwa C., Seth M. Physiology of Seed Dormancy and Germination - A Re-view // *Journal of Pharmaceutical Research International*. 2021. Vol. 33. No 58A. P. 557-562.
36. Paparella S., Araújo S. S., Rossi G. Seed priming: state of the art and new perspectives // *Plant Cell Reports*. 2015. Vol. 34. P. 1281-1293.
37. Qiu Z. B., Guo J. L. Nitric oxide acts as a signal molecule in microwave pretreatment induced cadmium tolerance in wheat seedlings // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013. Vol. 35. P. 65-73.
38. Qiu Z. B., Zhang M. M., Guo J. L., Lei M. Y. Role of nitric oxide in improving cadmium tolerance of microwave-pretreated wheat seedlings // *Chinese Journal of Ecology (Sheng Tai Xue Za Zhi)*. 2013. Vol. 32. P. 1794-1799.
39. Radzevičius A. The effect of strong microwave electric field radiation on: (1) vegetable seed germination and seedling growth rate // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2013. Vol. 100. P. 179-184.
40. Reddy M. V. B., Raghavan G. S. V., Kushalappa A. C., Paulitz T. C. Effect of microwave treatment on quality of wheat seeds with *Fusarium graminearum* // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998. Vol. 71. No 2. P. 113-117.
41. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. P. 95-108.
42. Romero-Galindo R. Biophysical methods used to generate tolerance to drought stress in seeds and plants: a review // *International Agrophysics*. 2022. Vol. 35. No. 4. P. 389-410.
43. Sahin H. Effects of microwaves on the germination of weed seeds // *Journal of Biosystems Engineering*. 2014. Vol. 39. P. 304-309.
44. Scialabba A., Tamburello C. Microwave effects on germination and growth of radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings // *Acta Botanica Gallica*. 2002. Vol. 149. No 2. P. 113-123.
45. Schmidt M., Zannini E., Arendt E. Recent advances in physical post-harvest treatments for shelf-life extension of cereal crops // *Foods*. 2018. Vol. 7. P. 45.
46. Sirohi R., Tarafdar A. Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward // *Food Research International*. 2021. Vol. 145. P. 110396.

47. Shashurin M. M. Physiological responses of *Plantago media* to electromagnetic field of power-line frequency (50 Hz) // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2014. Vol. 61. No 4. P. 484-488.
48. Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines // *Journal of Business Research*. 2019. Vol. 104. P. 333-339.
49. Sukiasyan A., Mikaelyan Y., Ayrapetyan S. Comparative study of non-ionizing and ionizing radiation effect on hydration of winter wheat seeds in metabolic active and inactive states // *The Environmentalist*. 2012. Vol. 32. No 2. P. 188-192.
50. Taheri S., Brodie G., Jacob M. V., Antunes E. Dielectric properties of chickpea, red and green lentil in the microwave frequency range as a function of temperature and moisture content // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2018. Vol. 52. No 3. P. 198-214.
51. 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-Food Science and Technology*. 2020. Vol. 129. P. 109534.
52. Taheri S., Brodie G.I., Gupta D. Microwave Heating for Grain Treatment // *Agritech: Innovative Agriculture Using Microwaves and Plasmas*. 2022. Springer, Singapore. P. 165-197.
53. Talei D., Valdiani A., Maziah M., Mohsenkhah M. Germination response of MR 219 rice variety to different exposure times and periods of 2450 MHz microwave frequency // *The Scientific World Journal*. 2013. P. 408026.
54. Torraco R. J. Writing integrative reviews of the literature: Methods and purposes // *International Journal of Adult Vocational Education and Technology (IJAVET)*. 2016. Vol. 7. No 3. P. 62-70.
55. Tuan P. A., Kumar R., Rehal P. K., Toora P. K., Ayele B. T. Molecular mechanisms underlying abscisic acid/gibberellin balance in the control of seed dormancy and germination in cereals // *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. P. 668-681.
56. Vázquez-Hernández M. C., Parola-Contreras I., Montoya-Gómez L. M. Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production // *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 250. P. 223-229.
57. Vian A., Roux D., Girard S. Microwave irradiation affects gene expression in plants // *Plant Signaling & Behavior*. 2006. Vol. 1. No 2. P. 67-70.
58. Vian A., Davies E., Gendraud M., Bonnet P. Plant responses to high frequency electromagnetic fields // *BioMed research international*. 2016. P. 1-13.
59. Villagómez-Aranda A. L. Activating stress memory: Eustressors as potential tools for plant breeding // *Plant Cell Reports*. 2022. Vol. 41. No. 7. P. 1481-1498.
60. Wang D. X., Liu Y. Lethal effects of microwave treatment on *Sitophilus oryzae* Linnaeus and germination rate of wheat // *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2011. Vol. 25. No 1. P. 105-109.
61. Wang S. M., Wang J. F., Guo Y. B. Microwave irradiation enhances the germination rate of tartary buckwheat and content of some compounds in its sprouts // *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2018. Vol. 68. P. 195-205.
62. Wang J., Ma H., Wang S. Application of ultrasound, microwaves, and magnetic fields techniques in the germination of cereals // *Food Science and Technology Research*. 2019. Vol. 25. No 4. P. 489-497.
63. Wu X. H., Luo G. Q., Feng J. M. Effects of microwave treatment on the nitrogen metabolism of oat seedlings under Na₂CO₃ stress // *J. Microwaves (Wei Bo Xue Bao)*. 2017. Vol. 33. P. 91-96.
64. Yadav D. N., Anand T., Sharma M., Gupta R. K. Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview // *Journal of Food Science and Technology*. 2014. Vol. 51. P. 3568-3576.
65. Yanenko A. F., Matsibura A. P., Peregodov S. N., Uniyaka T. L. Impact of microwave radiation on vegetable biological objects // 14th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Sevastopol, 2004. P. 721-722.
66. Ye J., Hong T., Wu Y. Model stirrer based on a multi-material turntable for microwave processing materials // *Materials*. 2017. Vol. 10. No 2. P. 95.

Информация об авторах

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ Аграрный научный центр «Донской» (РФ, 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 14), e-mail: oleg-b@list.ru

Брагинцев Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ Аграрный научный центр «Донской» (РФ, 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 14), e-mail: Al.55552015@yandex.ru

Authors Information

Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Agricultural Scientific Centre «Donskoy» (14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia), e-mail: oleg-b@list.ru

Braginets Andrey Valereyevich, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Agricultural Scientific Centre «Donskoy» (14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia), e-mail: Al.55552015@yandex.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-52

**INVESTIGATION OF TRANSPORTATION OF APPLES IN CONTAINERS ON
ROADS WITH DIFFERENT SURFACES**

**L. P. Belyu¹, I. A. Uspensky², I. A. Yukhin², O. V. Filyushin²,
A. A. Kuttyrev², E. V. Mitrokhina³**

¹ *Moscow Economic Institute
Moscow, Russian Federation*

² *Ryazan Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*

³ *Academy of the Federal Penitentiary Service of Russia
Ryazan, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: ivan.uspensckij@ya.ru

Received 10.02.2023

Submitted 14.06.2023

The research was carried out within the framework of the project "Improvement of technologies, means of mechanization, electrification and technical service in agricultural production. Prospects for the development of rural areas", section 1.1. "Improving the efficiency of mobile equipment operation through the development of new designs and improving methods of maintaining its technical condition" (subsection 1.1.5. "Improving the operational performance of transport and technological machines during on-farm transportation of agricultural products in the agro-industrial complex") of the R&D plan of the Federal State Educational Institution of Higher Education for 2021-2025

Summary

This scientific article is devoted to the problem of mechanical damage to apples during their transportation in boxes on roads with different surfaces. Theoretical and laboratory tests were carried out and recommendations were made.

Abstract

Over the past decade, we have observed a constant and steady increase in the volume of agricultural products produced in the Russian Federation. At the same time, the volume of livestock production almost doubled, and crop production tripled. Therefore, there is an objective need for the transportation of agricultural products throughout the Russian Federation. Transportation of agricultural products is carried out by all types of transport. An important place among them is occupied by transportation by road. However, the use of this type of transport when transporting agricultural products has a number of features, which include the presence of road infrastructure, the condition of the road surface, the influence of weather and climatic