

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 633.853.488:631.531.027.33

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-238-245>

Поступила в редакцию 04.04.2023

Received 04.04.2023

Н. В. Пушкина¹, В. И. Мартынюк¹, С. В. Василевич^{2,3}¹Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика²Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь³Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН РЕДЬКИ МАСЛИЧНОЙ**

Аннотация. В работе приведены данные исследования действия экзогенной обработки интенсивным электромагнитным полем (ЭМП) на прорастание семян редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.). Дано описание экспериментального стенда для исследуемой электромагнитной обработки семян, методики и результатов экспериментов по обработке семян редьки масличной. Показано, что обработка семян интенсивным электромагнитным полем редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.) в течение 2 с существенно стимулирует рост корней и побегов, при этом выраженного действия на всхожесть не оказывает. Обработка семян интенсивным электромагнитным полем в течение 4 с повышает всхожесть исследуемой культуры на 8 % и стимулирует ростовые параметры. Таким образом, различные экспозиции исследуемого воздействия могут быть использованы для разных целей: обработка 2 с – для стимуляции ростовых параметров, 4 с – для стимуляции всхожести. Приведены данные замеров содержания оксидов азота на выходе из реакционной зоны. Отмечено, что содержание NO_x составило 44 ppm, т. е. концентрация окислов азота на выходе реактора составляет 0,44 %. Показано, что использование описанного способа позволило увеличить всхожесть семян и скорость их роста, при этом достаточное время обработки семян составило 2 с, в то время как использование традиционных способов обработки семян предусматривает время от 5 до 30 с. Это значительно снижает энергозатраты процесса обработки семян интенсивным электромагнитным полем в сравнении с прототипами. Использование описанной технологии позволяет повысить качество электромагнитной обработки семян редьки масличной, повысить производительность (за счет снижения времени обработки), снизить удельные энергозатраты (за счет более высокого КПД технологии по сравнению с технологиями, реализующими иной способ генерирования ЭМП).

Ключевые слова: электромагнитное излучение, плазменный генератор, семена растений, цирканнуальные ритмы**Для цитирования:** Пушкина, Н. В. Использование интенсивного электромагнитного поля для предпосевной обработки семян редьки масличной / Н. В. Пушкина, В. И. Мартынюк, С. В. Василевич // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2024. – Т. 62, № 3. – С. 238–245. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-238-245>Nadezhda V. Pushkina¹, Viktor I. Martyniuk¹, Siarhei V. Vasilevich^{2,3}¹Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus²Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus³Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus**USAGE OF AN INTENSE ELECTROMAGNETIC FIELD FOR PRE-SOWING TREATMENT
OF OIL RADISH SEEDS**

Abstract. The paper presents data from a study of the effect of exogenous treatment with an intense electromagnetic field (EMF) on the germination of oil radish seeds (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.). Description of the experimental stand for the studied electromagnetic seed treatment, methodology and results of experiments on treatment of oil radish seeds is presented. It has been shown that treatment of oil radish seeds (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.) with an intense electromagnetic field for 2 seconds significantly stimulates the growth of roots and shoots, while having no pronounced effect on germination. Treatment of seeds with an intense electromagnetic field for 4 seconds increases the germination of the studied crop by 8 % and stimulates growth parameters. Thus, different exposures can be used for different purposes: a 2 second treatment to stimulate growth parameters, a 4 second treatment to stimulate germination. Data from measurements of the content of nitrogen oxides at the outlet of the reaction zone are presented. It was noted that the NO_x content made 44 ppm, i. e. concentration of nitrogen oxides at the reactor outlet is 0.44 %. It was shown that the described method made it possible to increase the germination of seeds and the rate of their growth, and the sufficient seed treatment time was 2 seconds, while the use of traditional methods of seed treatment require 5 to 30 seconds. This significantly reduces the energy consumption for seed treatment process with an intense electromagnetic field in comparison with prototypes. The described technology makes

it possible to improve the quality of electromagnetic treatment of oil radish seeds, increase productivity (by reducing processing time), and reduce specific energy costs (due to the higher efficiency of the technology compared to technologies that implement a different method of generating EMF).

Keywords: electromagnetic radiation, plasma generator, plant seeds, circannual rhythms

For citation: Pushkina N. V., Martynyuk V. I., Vasilevich S. V. Usage of an intense electromagnetic field for pre-sowing treatment of oil radish seeds. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 3, pp. 238–245. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-238-245>

Введение. Проблема воздействия неионизирующих электромагнитных излучений на биологические объекты изучается достаточно давно, однако широкого практического применения для повышения всхожести семян культурных растений так и не получила. Положительное влияние малых доз излучения на всхожесть, прорастание и урожайность семян растений сельскохозяйственных культур известна [1–3]. Плазменная технология обработки семян была впервые испытана российскими учеными, инженерами, технологами, биологами в Ленинграде (ныне Санкт-Петербург) в 1990 г. После чего была апробирована в других городах Российской Федерации, а также в Беларуси, Казахстане, США, Южной Корее и т. д. Обработка плазмой происходит в специальной газовой среде с пониженным давлением. «Плазменные семена» (так принято называть обработанные плазмой семена) уже не первый год активно продаются на международном рынке и хорошо себя зарекомендовали.

Первоначально обработка холодной плазмой в основном служила для стерилизации чувствительных к температуре материалов [4, 5], чуть позже был отмечен положительный эффект инактивации патогенных микроорганизмов в пищевой промышленности, биомедицине [6–8], в последнее десятилетие плазменная нетермическая обработка стала активно применяться в сельском хозяйстве.

Цель данной работы – исследование действия экзотермической обработки семян интенсивным электромагнитным излучением на всхожесть и первичные ростовые параметры редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.).

Описание экспериментального стенда. В исследовании для получения электромагнитного излучения использовалась технология электротермического псевдооживленного (кипящего) [9] слоя, поддерживаемого электрическим разрядом. Это позволило подвергать исследуемые образцы тройному (комплексному) воздействию экстремальных факторов: абразивному воздействию на образцы (семена) кипящего слоя, кратковременному воздействию повышенной температуры (в верхней части рабочей камеры до 300 °С) и воздействию электромагнитных полей, генерируемых в кипящем слое при наличии высоковольтного поля под воздействием микроразрядов и стримеров.

Для проведения экспериментальных исследований материалов на базе физико-технической лаборатории Института ядерных проблем БГУ был разработан и изготовлен экспериментальный стенд¹ [10], принципиальная схема которого приведена на рис. 1.

Экспериментальный стенд состоит из установленной вертикально рабочей камеры 1 (из кварцевого

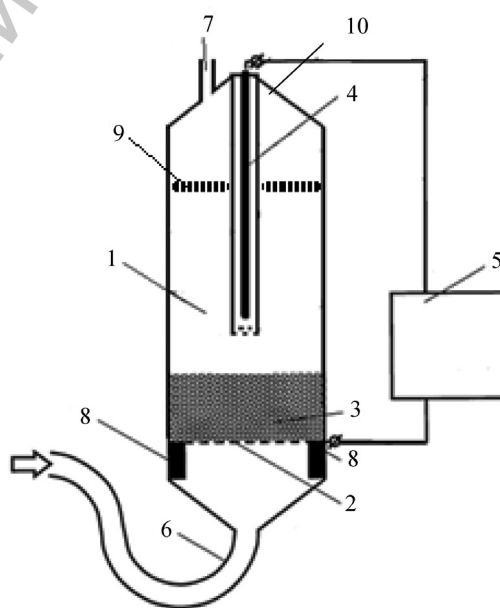


Рис. 1. Схема экспериментального стенда электротермического кипящего слоя для получения плазмы тлеющего разряда с образованием интенсивных ЭМП за счет процессов в дисперсном слое при высоковольтном напряжении

Fig. 1. Layout of the experimental stand of the electrothermal fluidized bed for obtaining glow discharge plasma with the formation of intense EMF due to processes in the dispersed layer at high voltage

¹ Устройство для получения плазмы тлеющего разряда: евраз. пат. 037157 / В. И. Мартынюк, В. А. Зеленин, С. Ф. Сенько, Д. С. Быченко, А. Г. Любимов. Оpubл. 12.02.2021.

высокотемпературного стекла), в нижней части которой смонтированы решетка 2 (выполнена из титана – 50×50 мкм и служит нижним электродом для подачи высокого напряжения) с расположенным на ней порошком 3 (использован электропроводящий порошок железа с размером частиц ≤ 1 мм), совместно образующие катод, а в верхней части расположен анод 4 (выполнен в виде металлического стержня с металлической решеткой или плоской пластиной (электродом) на нижнем торце). На решетку 2 и анод 4 подается напряжение от источника высоковольтного электропитания 5. В качестве источника высокого напряжения использован источник питания БП-100 (с напряжением на выходе до 7 кВ). Рабочий газ подается через штуцер подачи газа 6, расположенный в нижней части рабочей камеры 1. Для подачи реагента (воздуха) для ожигения слоя был использован штатный безмасляный компрессор. Газ удаляется из рабочей камеры 1 через штуцер отвода газа 7. Во избежание в процессе работы перегрева тонкой решетки 2 она снабжена массивным металлическим основанием 8, служащим теплоотводом. В верхней части рабочей камеры расположена сетка 9, препятствующая вылету семян за пределы рабочей зоны. Семена растений скапливаются под этой сеткой, поддерживаемые потоком газа, нагнетаемого компрессором. Для подачи семян на верхнем торце рабочей камеры расположена крышка 10.

Работа на экспериментальном стенде проводилась следующим образом. Решетка 2 присоединялась к отрицательному электроду источника электропитания, а анод 4 – к положительному. Включением высоковольтного источника электропитания 5 на электроды подавалось рабочее напряжение, порошок 3 при этом заряжался отрицательно. Поскольку расстояние между решеткой 2 со слоем порошка 3 и анодом 4 в этот момент было велико, ток через устройство не протекал. Затем через штуцер подачи газа 6 в рабочую камеру 1 пускали воздух из компрессора. Под действием потока воздуха порошок 3 псевдоожигался, расстояние между порошком 3, несущим отрицательный заряд, и анодом 4, заряженным положительно, значительно сокращалось, и в результате возникал электрический пробой, который ионизировал газовый промежуток. В следующий момент времени вследствие лавинной ионизации газа в межэлектродном пространстве рабочей камеры 1 загоралась плазма. Затем открывали крышку 10 на верхнем торце рабочей камеры и семена растений засыпали в рабочую камеру. Так как семена имеют меньшую плотность (меньше 1 г/см^3), чем частицы электропроводящего слоя (насыпная плотность порошка железа – $1,66 \text{ г/см}^3$), то потоком воздуха семена поднимались и скапливались в верхней части рабочей камеры (под специальной ограничивающей сеткой), где совершали интенсивные колебательные и вращательные движения (наблюдаемые визуально при выключенном высоковольтном источнике электропитания). Газ (воздух) свободно выходил через штуцер 7. По истечении времени, требуемого для обработки, источник питания отключали и семена извлекались из реактора.

Проведенные предварительные исследования¹ показали наличие широкого спектра ЭМП в интервале частот от 0,3 до 40 ГГц. В этой связи целесообразно применение данной технологии получения интенсивных электромагнитных полей в отличие от традиционной технологии получения ЭМП, используемой в работах [11, 12] (например, генератор «Биоритм-1»). Предлагаемый способ² подразумевает более широкий спектр физических явлений в комплексном воздействии на биологические объекты (семена сельскохозяйственных культур), а именно: ультрафиолетовое излучение, СВЧ, терагерцовое излучение, повышенная температура, наличие озона, градиент высоковольтного потенциала, абразивное воздействие в интенсивном потоке газообразного носителя (воздуха) и др. В работе [11] авторы сообщают, что минимальное время облучения семян составляет 12 ч, но в предложенном способе время воздействия на семена исчисляется секундами, что является следствием кумулятивного эффекта перечисленных выше физических факторов воздействия. Возможно, значительный вклад в интенсификацию прорастания семян вносит СВЧ-излучение³ [13], но не исключено определяющее воздействие излучения крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона, наличие которого установлено экспериментально⁴.

¹ Способ генерации излучения электромагнитных волн широкого и непостоянного спектра: пат. ВУ 23960 / В. И. Мартынюк, Н. Н. Гринчик, С. Ф. Сенько, Н. В. Любецкий, О. Г. Мартинов, Д. С. Быченко, С. Ф. Максименко, В. А. Зеленин, В. Н. Дронов. Оpubл. 28.02.2023.

² Там же.

³ Павлов А. В. Воздействие электромагнитных излучений на жизнедеятельность: учеб. пособие. М.: Гелос АРВ, 2002. 224 с.

⁴ Патент ВУ 23960.



Рис. 2. Процесс обработки образцов (семенного материала) с использованием электротермического кипящего слоя

Fig. 2. Process of sample (seed material) treatment using an electrothermal fluidized bed

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использовались семена редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.), которые подвергались обработке плазмой с использованием экспериментального стенда (рис. 1) в течение 2 и 4 с. На рис. 2 представлена фотография процесса обработки семян с использованием экспериментального стенда.

Визуальные наблюдения за процессом обработки семян показали, что семена увлекаются потоком воздуха в верхнюю часть реактора и совершают вращательные и колебательные движения в воздушном потоке под ограничивающей сеткой.

Особенность описанного способа обработки семян заключается в том, что семена не присутствуют в плазме высоковольтного электрического разряда, а находятся на его периферии, в потоке воздуха под верхней сеткой, служащей препятствием их уносу за пределы рабочей зоны. Семена не попадают в зону плазменного разряда, но в полной мере получают сопровождающие плазменный разряд физические действия, а именно: 1) повышенную температуру восходящего потока газа; 2) облучение ультрафиолетом от низкотемпературной плазмы; 3) воздействие озона; 4) интенсивное микроволновое излучение, возникающее в псевдооживленном слое (микроразряды между частицами порошка, краевые явления на остриях, локальные явления ускорения и торможения ионов и электронов в поле высокого градиента напряжения). Совокупность этих факторов и создает требуемый эффект – стимулирование всхожести семян и первичных ростовых параметров.

Обработка производилась в Институте ядерных проблем БГУ. Необработанные семена служили контролем.

Эксперименты были заложены в лабораторных условиях с трехкратной повторяемостью для каждого варианта. Семена редьки масличной проращивали в чашках Петри на увлажненной фильтровальной бумаге. Их выдерживали первые три дня прорастания при пониженной температуре (5 °С), далее до 14-го дня роста – при температуре 20–21 °С и ежедневно производили замеры. Каждая партия контрольных и обрабатываемых образцов содержала по 100 семян.

Согласно ISTA (International Seed Testing Association) энергию прорастания семян редьки масличной определяли на 7-й день роста, а всхожесть – на 14-й день. Проросшими считали проросшие семена с зародышевым корешком около 2 мм.

Морфометрические параметры (длину и массу корней и побегов) исследуемой культуры определяли на 14-й день роста [14].

Результаты исследований и их обсуждение. В результате проведенных исследований установлено, что предпосевная обработка семян интенсивным электромагнитным полем в течение 4 с максимально повышала всхожесть редьки масличной на 8 % в условиях лабораторных опы-

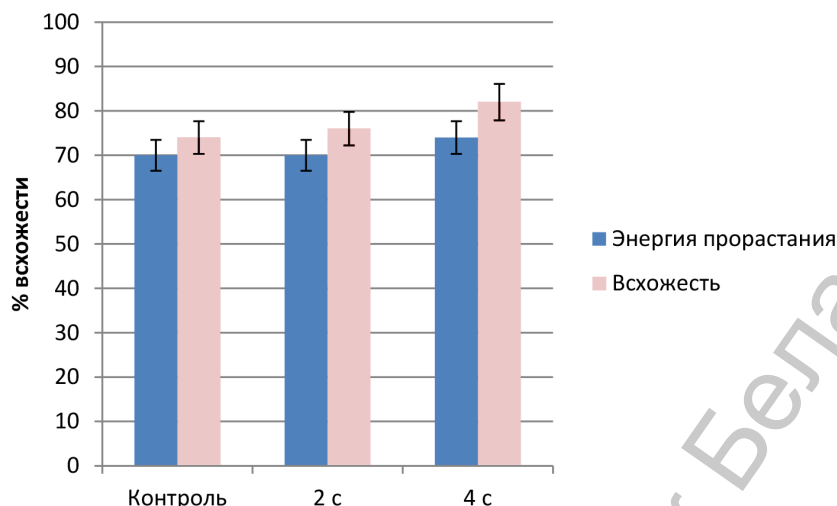


Рис. 3. Влияние обработки семян интенсивным электромагнитным полем на энергию прорастания и всхожесть редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.)

Fig. 3. Effect of seed treatment with an intense electromagnetic field on the germination energy and germination speed of oil radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.)

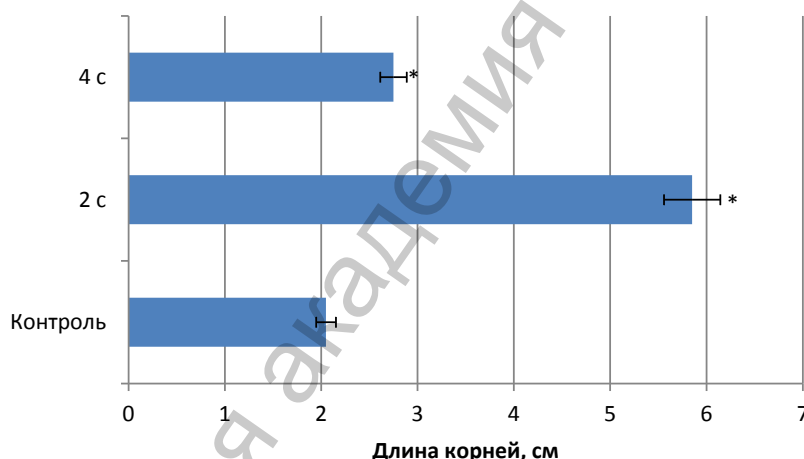


Рис. 4. Влияние обработки семян интенсивным электромагнитным полем на длину корней редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.) в лабораторных опытах (* различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $p < 0,05$)

Fig. 4. Effect of seed treatment with an intense electromagnetic field on the length of the roots of oil radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.) in laboratory experiments (* differences are statistically reliable compared to the control, $p < 0.05$)

тов (рис. 3). При этом исследуемая обработка не оказывала выраженного действия на энергию прорастания.

Такие морфометрические параметры, как длина корней и проростков, изменялись следующим образом. Предпосевное воздействие интенсивным электромагнитным полем с экспозицией 2 с повышало длину корня на 285 %, а воздействие с экспозицией 4 с – на 134 % (рис. 4).

Длина побегов изменялась аналогично длине корней. Обработка семян интенсивным электромагнитным полем повышала данный параметр на 400 % после воздействия 2 с и на 212,5 % – после облучения с экспозицией 4 с (рис. 5).

В результате проведенных исследований видно, что обработка семян редьки масличной интенсивным электромагнитным полем с экспозицией 2 с существенно стимулирует рост корней и проростков, при этом выраженного действия на всхожесть не оказывает. Возможно, имел место эффект компенсации за счет того, что всхожесть не повышалась, а существенно возросли

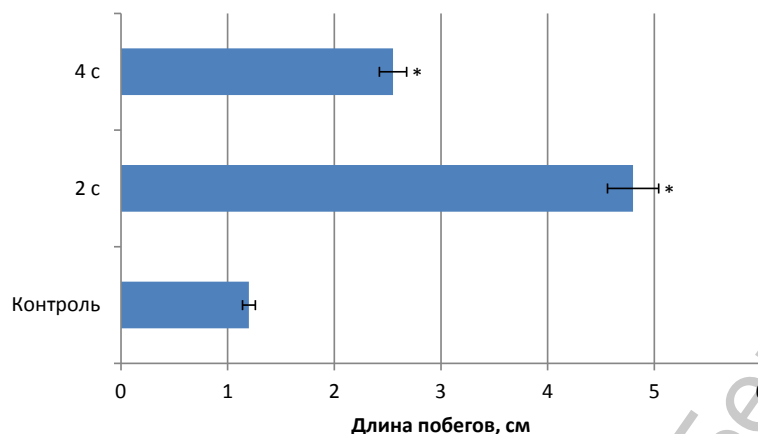


Рис. 5. Влияние обработки семян интенсивным электромагнитным полем на длину побегов редьки масличной (*Raphanus sativus L. var. oleifera Metzg.*) в лабораторных опытах (* различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $p < 0,05$)

Fig. 5. Effect of seed treatment with an intense electromagnetic field on the length of shoots of oil radish (*Raphanus sativus L. var. oleifera Metzg.*) in laboratory experiments (* differences are statistically reliable compared to the control, $p < 0.05$)

морфометрические параметры. А обработка семян интенсивным электромагнитным полем с экспозицией 4 с повышает лабораторную всхожесть исследуемой культуры на 8 % и стимулирует ростовые параметры (рис. 6). Таким образом, различные экспозиции исследуемого воздействия могут быть использованы для разных целей: обработка 2 с – для стимуляции ростовых параметров, 4 с – для стимуляции всхожести.

В ходе работы экспериментального стенда дополнительно проводились оценки напряженности электрического поля в В/м в интервале частот от 0,3 до 40 ГГц с помощью измерителя электромагнитных излучений ПЗ-31 снаружи рабочей камеры. В качестве чувствительного элемента использовалась изотропная антенна типа А-1 из комплекта измерителя, чувствительная к плотности потока энергии. Уровень белого шума 615 В/м¹. Эти измерения показывают, что внутри рабочей зоны уровень электромагнитного излучения по крайней мере на порядок выше. В Институте ядерных проблем БГУ были проведены измерения (в декабре 2022 г.) содержания окислов азота с использованием штатного прибора Testo 340, предоставленного Центром коллективного пользования Института энергетики НАН Беларуси. Содержание NO_x составило 44 ppm, т. е. концентрация окислов азота на выходе реактора составляет 0,44 %. Нужно отметить, что в целях безопасности прибора и персонала, ввиду наличия высокого напряжения – 7 кВ, забор пробы отходящих газов осуществлялся с использованием изолирующего патрубка длиной 0,5 м. То есть следует ожидать, что реальная концентрация окислов азота (N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₄,



Рис. 6. Фотографии контрольного (I) и обработанного (II) образцов на 7-й день роста (a) и на 14-й день роста (b)

Fig. 6. Photos of control (I) and treated (II) samples on the 7th day of growth (a) and on the 14th day of growth (b)

¹ Патент ВУ № 23960.

N_2O_5) на порядок выше [15]. Наличие окислов азота свидетельствует, что в рабочей зоне происходит интенсивное образование O_3 и атомарного кислорода, необходимых (с большим весом) для образования окислов [15].

Заключение. Из данного исследования следует, что обработка семян интенсивным электромагнитным полем может ускорять прорастание семян и увеличивать длину проростков редьки масличной (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera* Metzg.). Использование описанного способа позволило увеличить всхожесть семян и скорость их роста, при этом достаточное время обработки семян составило 2 с, в то время как использование традиционных способов обработки семян предусматривает время от 5 до 30 с. Это значительно снижает энергозатраты процесса обработки семян интенсивным электромагнитным полем в сравнении с прототипами.

Как видно из приведенного выше исследования, использование предлагаемой технологии позволяет повысить качество электромагнитной обработки семян редьки масличной, увеличить производительность (за счет снижения времени обработки), снизить удельные энергозатраты (за счет более высокого КПД технологии по сравнению с технологиями, реализующими иной способ генерирования ЭМП).

Список использованных источников

1. Исследование энергии прорастания и всхожести семян горчицы при сушке импульсным ИК-способом / Н. А. Зуев [и др.] // Вестн. ФГОУВПО «Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В. П. Горячкина». – 2011. – № 2 (47). – С. 7–10.
2. Пушкина, Н. В. Влияние предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на структурно-функциональное состояние проростков кукурузы / Н. В. Пушкина // Междунар. науч.-исслед. журн. – 2016. – № 4 (46), ч. 5. – С. 32–34. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.46.265>
3. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Г. В. Козьмин [и др.]; под общ. ред. Г. В. Козьмина, С. А. Гераськина, Н. И. Санжаровой. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2015. – 399 с.
4. Корнев, И. И. Низкотемпературные методы стерилизации в профилактике хирургической инфекции / И. И. Корнев, Г. А. Баранов, В. И. Ульянов // Хирургия. Журн. им. Н. И. Пирогова. – 2011. – № 6. – С. 43–47.
5. Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms / M. Moisan [et al.] // Int. J. Pharm. – 2001. – Vol. 226, № 1–2. – P. 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00752-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00752-9)
6. 1st International Workshop on Plasma Agriculture (IWOPA-1), May 15th–20th 2016, USA [Electronic resource] / Plasma Inst. in Camden; ed. A. Drexel. – Mode of access: <http://www.iwopa.org/program/IWOPA-1%20Abstracts.pdf>. – Date of access: 10.03.2023.
7. Thirumdas, R. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing / R. Thirumdas, C. Sarangapani, U. S. Annapure // Food Biophys. – 2015. – Vol. 10, № 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9382-z>
8. Исследование влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на структуру дермы полуфабриката из шкур речных рыб: сазана и судака / И. Ш. Абдуллин [и др.] // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 75–77.
9. Забродский, С. С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем: общие вопросы разработки и исходные закономерности / С. С. Забродский. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.
10. Разработка экспериментального стенда электротермического кипящего слоя для исследования высокотемпературных процессов в газовых потоках / С. В. Василевич [и др.] // Авиаци. вестн. – 2020. – № 2. – С. 12–15.
11. Применение СВЧ технологии сверхнизкой интенсивности в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] / А. А. Гаврилова [и др.] // Журн. радиоэлектроники. – 2014. – № 11. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/14/text.pdf>. – Дата доступа: 10.03.2023.
12. Никулин, Н. Р. Физические механизмы воздействия СВЧ-излучения низкой интенсивности на биологические объекты: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.04; 03.00.02 / Н. Р. Никулин; Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2004. – 18 с.
13. Бецкий, О. В. Современные представления о механизме воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты / О. В. Бецкий, Н. Н. Лебедева // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 1. – С. 5–19.
14. Handbook of vigour test methods / ed.: J. G. Hampton, D. M. TeKrony. – 3rd ed. – Zurich: ISTA, 1995. – 119 p.
15. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1966. – 686 с.

References

1. Zuev N. A., Rudobashta S. P., Zotova E. Yu., Zueva G. A. Study on mustard seed germination and sprouting force in pulse infrared drying. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V. P. Goryachkina"* = *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin"*, 2011, no. 2 (47), pp. 7–10 (in Russian).

2. Pushkina N. V. Influence of pre-sowing seeds treatment by the electromagnetic field superhigh-frequency range on the structurally functional condition corn rootlets. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2016, no. 4 (46), pt. 5, pp. 32–34 (in Russian). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.46.265>
3. Koz'min G. V., Geras'kin S. A., Sanzharova N. I. (eds.). *Radiation technologies in agriculture and food industry*. Obninsk, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, 2015. 399 p. (in Russian).
4. Kornev I. I., Baranov G. A., Ul'ianov V. I. Low-temperature sterilization for the surgical infection prophylaxis. *Khirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2011, no. 6, pp. 43–47 (in Russian).
5. Moisan M., Barbeau J., Moreau S., Pelletier J., Tabrizian M., Yahia L'H. Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *International Journal of Pharmaceutics*, 2001, vol. 226, no. 1–2, pp. 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00752-9](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00752-9)
6. *1st International Workshop on Plasma Agriculture (IWOPA-1), May 15th–20th 2016, USA*. Available at: <http://www.iwopa.org/program/IWOPA-1%20Abstracts.pdf> (accessed 10.03.2023).
7. Thirumdas R., Sarangapani C., Annapure U. S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. *Food Biophysics*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9382-z>
8. Abdullin I. Sh., Tikhonova V. P., Rakhmatullina G. R., Akhverdiev R. F., Artem'eva O. V., Nizamova D. K. Study of the influence of non-equilibrium low-temperature plasma on the structure of dermis of semi-finished products from the skins of river fish: Eurasian carp and sander. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 1, pp. 75–77 (in Russian).
9. Zabrodskii S. S. *High-temperature units with a fluidized bed: general design issues and initial regularities*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 328 p. (in Russian).
10. Vasilevich S. V., Stepanenko V. N., Martynyuk V. I., Sen'ko S. F., Shaporova E. A. Development of an experimental stand for electrothermal boiling layer for research of high-temperature processes in gas flows. *Aviatsionnyi vestnik = The Aviation Herald*, 2020, no. 2, pp. 12–15 (in Russian).
11. Gavrilova A. A., Egorashin V. G., Churmasov A. V., Krevsky M. A. The use of microwave technology of ultralow intensity in agriculture. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 11. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/nov14/index_e.html (accessed 10.03.2024) (in Russian).
12. Nikulin N. R. *Physical mechanisms of low-intensity microwave radiation impact on biological objects*. Volgograd, 2004. 18 p. (in Russian).
13. Betskii O. V., Lebedeva N. N. Modern ideas about the mechanism of low-intensity millimeter waves impact on biological objects. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine* [Millimeter Waves in Biology and Medicine], 2001, no. 1, pp. 5–19 (in Russian).
14. Hampton J. G., TeKrony D. M. (eds.). *Handbook of vigour test methods*. 3rd ed. Zurich, International Seed Testing Association, 1995. 119 p.
15. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1966. 688 p. (in Russian).

Информация об авторах

Пушкина Надежда Викторовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nadyapushkina@gmail.com

Мартынюк Виктор Иванович – научный сотрудник, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь).

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, Институт энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, кор. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь); ведущий научный сотрудник, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Information about the authors

Nadezhda V. Pushkina – Ph. D. (Biology), Researcher, Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University (11, Bobruyskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nadyapushkina@gmail.com

Viktor I. Martynyuk – Researcher, Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University (11, Bobruyskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus (2, bld. 15, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Leading Researcher, Belarusian State Academy of Aviation (77, Ubovich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru