

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.311.86:631.462:621.384.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>



Исследование работы устройства для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере

И.Г. Поспелова¹, М.Н. Ерохин², П.В. Дородов³, С.П. Казанцев⁴, И.В. Возмищев⁵

^{1,3} Удмуртский государственный аграрный университет; г. Ижевск, Россия

^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

⁵ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; г. Ижевск, Россия

¹ pospelovaig@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

³ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

⁴ kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

⁵ vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>

Аннотация. Обработку почвы от вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур с целью обеззараживания проводят альтернативными методами, к которым относят электромагнитное излучение различного спектра: ультрафиолетовое, инфракрасное, сверхвысокочастотное и высокочастотное. Авторами разработано устройство для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере. С целью оптимизации процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением поставлена задача получить уравнения регрессии режимов работы установки. Авторы исследовали различные режимы обработки ИК-излучением слоя почвосмеси на конвейере при толщине слоя 10...50 мм, высоте подвеса ИК излучателя 50...250 мм, мощности ИК излучателя 9,5...47,5 Вт. Получили три основные зависимости рабочего процесса: 1. Зависимость температуры почвосмеси от толщины слоя при постоянной мощности ИК-излучателя, постоянной высоте подвеса ИК-излучателя и постоянной скорости движения ленты конвейера. 2. Зависимость скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК-излучателя при постоянной мощности ИК-излучателя, постоянной толщине почвосмеси и фиксированном диапазоне температуры ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). 3. Зависимость скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя при постоянной высоте подвеса ИК-излучателя, постоянной толщине почвосмеси и фиксированном диапазоне температуры ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). Полученные уравнения регрессии с точностью аппроксимации 0,976...0,999 позволят рассчитать рабочие режимы установок разных типоразмеров, выполнить оптимизацию процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением и реализовать его в техническом исполнении с системой автоматического управления.

Ключевые слова: обеззараживание, ИК-излучение, почвосмесь, нагрев, конвейер, высота подвеса ИК-излучателя, мощность ИК-излучателя, скорость движения ленты конвейера, слой почвосмеси

Для цитирования: Поспелова И.Г., Ерохин М.Н., Дородов П.В., Казанцев С.П., Возмищев И.В. Исследование работы устройства для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 84-91. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the operation of an IR irradiator to disinfect the soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt

I.G. Pospelova^{1✉}, M.N. Erokhin², P.V. Dorodov³, S.P. Kazantsev⁴, I.V. Vozmishchev⁵

^{1,3} Udmurt State Agrarian University; Izhevsk, Russia

^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

⁵ Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Izhevsk, Russia

¹ pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

² er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

³ pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

⁴ kazantsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

⁵ vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>

Abstract. It is a common practice to treat soil against pests and pathogens of agricultural crops to ensure its disinfection using alternative methods, which include electromagnetic radiation of various spectrums: ultraviolet (UV), infrared (IR), microwave (microwave), and high frequency (HF). The authors have developed an IR irradiator to disinfect soil mixtures placed in a thin layer on a conveyor belt. In order to optimize soil mixture disinfection with IR irradiation, the task was set to obtain regression equations of the irradiator operation modes. The authors studied different modes of the IR irradiation of soil mixture layer placed on the conveyor belt at the layer thickness of 10 to 50 mm, the IR irradiator hanger height of 50 to 250 mm, and the IR irradiator power of 9.5 to 47.5 W. The authors studied three main relationships describing the working process. 1. Dependency of soil mixture temperature on layer thickness at the constant IR irradiator power, constant height of the IR irradiator hanger, and constant speed of the conveyor belt. 2. Dependency of the travel speed of the conveyor belt on the hanger height of the IR irradiator at its constant power, constant soil mixture thickness, and fixed temperature range ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). 3. Dependency of the conveyor belt travel speed on the IR irradiator power at a constant height of its hanger, constant soil mixture thickness, and fixed temperature range ($T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$). The obtained regression equations. Obtained regression equations with an approximation accuracy of 0.976 to 0.999 can facilitate the calculation of the operating modes of various-size irradiators, optimizing the disinfection of soil mixtures with IR irradiation and integrate it with an automatic control system.

Keywords: disinfection, IR irradiation, soil mixture, heating, conveyor, IR irradiator hanger height, IR irradiator power, conveyor belt speed, soil mixture layer

For citation: Pospelova I.G., Erokhin M.N., Dorodov P.V., Kazantsev S.P., Vozmishchev I.V. Study of the operation of an IR irradiator to disinfect the soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):84-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-84-91>

Введение

Одной из главных задач ресурсосберегающего земледелия является разработка технологий оптимального возделывания и обработки почвы с целью эффективного использования ее биологического потенциала. Современные технологии обработки почвы включают в себя химические методы борьбы с вредителями, болезнями и сорной растительностью. Использование химикатов приводит к насыщению почвы, растений и плодов вредными для человека и природы химическими соединениями. Для уменьшения влияния химии на почву, растения и плоды актуальным является использование альтернативных методов их обработки, к которым относят электромагнитное излучение различного спектра: ультрафиолетовое (УФ), инфракрасное (ИК), сверхвысокочастотное (СВЧ) и высокочастотное (ВЧ) [1-3].

Нами разработана установка для обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое

на конвейере [4-6]. Для ее эффективного функционирования необходимо провести на опытном образце ряд экспериментов.

Цель исследований: получить уравнения регрессии режимов работы установки на основе экспериментальных исследований, которые позволят выполнить оптимизацию процесса обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере.

Материалы и методы

Объектом исследований является почвосмесь, предназначенная для защищенного грунта, состоящая из торфа (~20%), компоста (~60%) и песка (~20%). Средняя массовая доля влаги составляет $40 \pm 5\%$, средняя объемная плотность – $1,1 \text{ г/см}^3$. В работе применена стандартная методика определения физических параметров почвы с использованием лабораторного оборудования. Из источников литературы известно, что температура почвы, при которой происходит ее

обеззараживание, составляет $95\pm 5^\circ\text{C}$. Превышение температуры заданного диапазона приводит к уничтожению полезных свойств, почва становится «мертвой» [4, 5].

Обработка и термометрия почвосмеси проводились на экспериментальной установке, схема которой показана на рисунке 1.

Чтобы не допустить перегрева почвосмеси и обеспечить ее обеззараживание ИК-излучением, близкое к равномерному, обработку проводили в тонком слое (менее 50 мм). Почвосмесь из бункера насыпали на ленту конвейера равномерным тонким слоем разной толщины (10...50 мм). Включали привод конвейера и ИК-излучатель и наблюдали за процессом обработки почвосмеси, контролируя ее температуру термометром с термошупом. Площадь обработки почвосмеси на конвейере ИК-излучателем, размером $0,6\times 0,25$ м, расположенным над лентой на высоте до 0,25 м, составляла $0,2\text{ м}^2$.

Методика исследований состоит из трех этапов:

1. Экспериментальное исследование зависимости температуры (T , $^\circ\text{C}$), почвосмеси от толщины (L , м) слоя $T = f_1(L)$ при постоянной мощности ИК-излучателя ($P = \text{const}$), постоянной высоте подвеса ИК-излучателя ($H = \text{const}$) и постоянной скорости движения ленты конвейера ($V = \text{const}$).

2. Экспериментальное исследование зависимости скорости (V , м/с), движения ленты конвейера от высоты (H , м) подвеса ИК излучателя $V = f_2(H)$ при постоянной мощности ИК-излучателя ($P = \text{const}$), постоянной толщине почвосмеси ($L = \text{const}$) и средней температуре ($T = 95\pm 5^\circ\text{C}$).

3. Экспериментальное исследование зависимости скорости (V , м/с) движения ленты конвейера

от мощности (P , Вт) ИК-излучателя $V = f_3(P)$ при постоянной высоте подвеса ИК-излучателя ($H = \text{const}$), постоянной толщине почвосмеси ($L = \text{const}$) и средней температуре ($T = 95\pm 5^\circ\text{C}$) [7, 8].

Результаты и их обсуждение

Для определения оптимальной толщины слоя на ленту конвейера насыпали слой почвосмеси 10...50 мм и проводили замеры температуры в срединном слое термометром с термошупом по истечении 30 с после включения ИК-излучателя. Замеры проводили с трехкратным повторением (табл. 1).

Графическое изображение табличных данных в относительных величинах показано на рисунке 2. Относительная температура почвосмеси в безразмерных единицах –

$$t = \frac{T}{T_0}, \quad (1)$$

где T – температура почвосмеси, $^\circ\text{C}$; T_0 – номинальная температура почвосмеси ($T_0 = 95\pm 5^\circ\text{C}$).

Относительная толщина слоя почвосмеси в безразмерных единицах –

$$l = \frac{L}{L_{\max}}, \quad (2)$$

где L – толщина слоя почвосмеси, м; $L_{\max}$ – максимальная толщина слоя почвосмеси ($L_{\max} = 0,05$ м).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$t = 4,791l^3 - 9,214l^2 + 3,965l + 0,672 \quad (3)$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,976$)¹ [9].

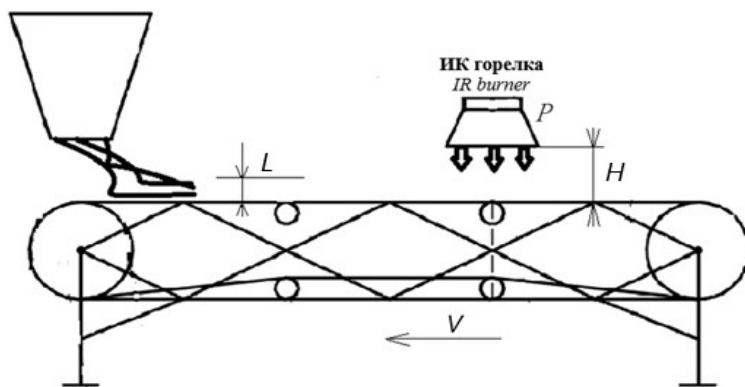


Рис. 1. Схема устройства для обеззараживания почвы и субстрата в тонком слое ИК-излучением:

P – мощность источника излучения (ИК-излучатель); H – высота подвеса ИК-излучателя;

L – толщина слоя почвосмеси; V – скорость движения ленты конвейера

Fig. 1. Schematic diagram of the IR irradiator for disinfecting soil and substrate placed in a thin layer:

P – radiation source (IR irradiator); H – IR irradiator hanger height; L – soil mixture layer thickness; V – conveyor belt speed

¹ Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ.

Результаты измерений показали, что слой почвосмеси толщиной 10 мм перегревается, а слой 30...50 мм не достигает номинальной температуры обеззараживания. Оптимальную толщину можно найти из уравнения (3) при $t = 1$, однако предварительно необходимо исследовать остальные параметры процесса.

Таблица 1
Зависимость температуры почвосмеси от толщины ее слоя

Table 1
Relationship between soil mixture temperature and the thickness of its layer

№ опыта Experiment No.	Температура, $T, ^\circ\text{C}$ Temperature, $T, ^\circ\text{C}$	Среднее значение температуры, $T, ^\circ\text{C}$ Average temperature value, $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя почвосмеси, $L, \text{м}$ Layer of soil mixture, L, m
1	110	$109,7 \pm 1,2$	0,01
	108		
	111		
2	100	$98,3 \pm 1,2$	0,02
	98		
	97		
3	82	$81,3 \pm 1,4$	0,03
	83		
	79		
4	31	$32,7 \pm 1,6$	0,04
	35		
	32		
5	20	$22,3 \pm 1,6$	0,05
	23		
	24		

Результаты исследования скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК излучателя показаны в таблице 2.

Графическое представление табличных данных в относительных величинах и их линия тренда показаны на рисунке 3. Относительная скорость движения ленты конвейера в безразмерных единицах –

$$v = \frac{V}{V_{\max}}, \quad (4)$$

где V – скорость движения ленты конвейера, мм/с; $V_{\max}$ – максимальная скорость движения ленты конвейера ($V_{\max} = 9,3 \text{ мм/с}$).

Относительная высота подвеса ИК излучателя в безразмерных единицах –

$$h = \frac{H}{H_{\max}}, \quad (5)$$

где H – высота подвеса ИК-излучателя, м; $H_{\max}$ – максимальная высота подвеса ИК излучателя ($H_{\max} = 0,25 \text{ м}$).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$v = -0,937h^3 + 1,330h^2 - 0,946h + 1,142 \quad (6)$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,998$)² [9].

Результаты исследования скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя представлены в таблице 3.

Табличные данные в графической форме в относительных величинах показаны на рисунке 4.

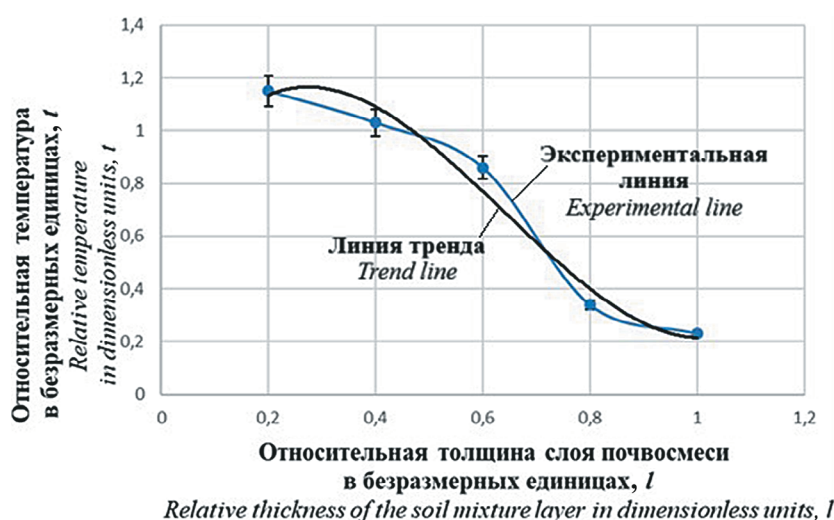


Рис. 2. Зависимость относительной температуры от относительной толщины слоя почвосмеси

Fig. 2. Relationship between the relative temperature and the relative thickness of the soil mixture layer

²Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ.

Зависимость скорости движения ленты конвейера от высоты подвеса ИК-излучателя (при $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

Таблица 2

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Скорость движения ленты конвейера, v , мм/с <i>Conveyor belt speed, v, mm/c</i>	Среднее значение скорости движения ленты конвейера, v , м/с <i>Average value of conveyor belt speed, v, m/c</i>	Высота подвеса ИК-излучателя, h , м <i>IR irradiator hanger height, h, m</i>
1	0,0095	$0,0093 \pm 0,0006$	0,05
	0,0100		
	0,0085		
2	0,0090	$0,0085 \pm 0,0004$	0,10
	0,0085		
	0,0079		
3	0,0075	$0,0080 \pm 0,0003$	0,15
	0,0080		
	0,0085		
4	0,0068	$0,0070 \pm 0,0002$	0,20
	0,0071		
	0,0072		
5	0,0057	$0,0055 \pm 0,0003$	0,25
	0,0055		
	0,0054		

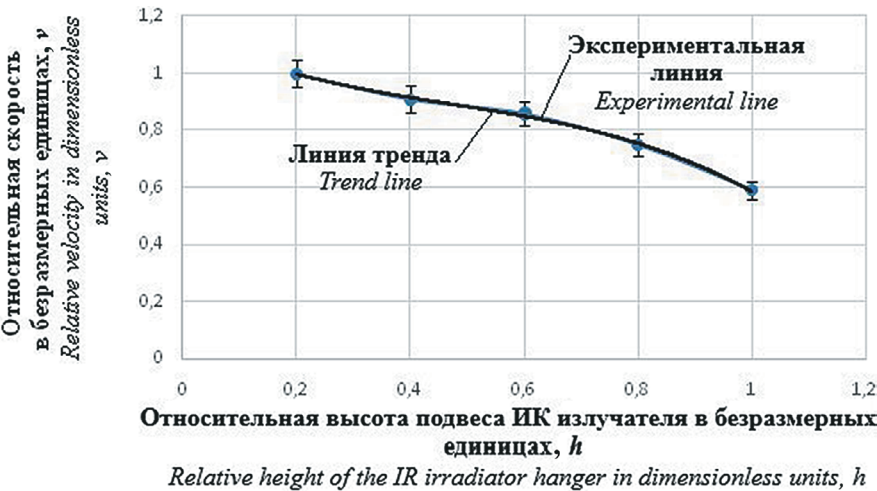


Рис. 3. Зависимость относительной скорости движения ленты конвейера от относительной высоты подвеса ИК-излучателя

Fig. 3. Relationship between the relative speed of the conveyor belt and the relative height of the IR irradiator hanger

Таблица 3

Зависимость скорости движения ленты конвейера от мощности ИК-излучателя (при $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

Table 3

Dependency curve of the conveyor belt speed on the IR irradiator power (at $T = 95 \pm 5^\circ\text{C}$)

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Скорость движения ленты конвейера, v , м/с <i>Conveyor belt speed, v, m/c</i>	Среднее значение скорости движения ленты конвейера, v , м/с <i>Average value of conveyor belt speed, v, m/c</i>	Мощность ИК-излучателя, P , Вт <i>IR irradiator power, P, W</i>
1	0,0083	$0,0080 \pm 0,0003$	9,5
	0,0076		
	0,0081		
2	0,0180	$0,0160 \pm 0,0015$	19
	0,0160		
	0,0140		
3	0,0270	$0,0250 \pm 0,0015$	28,5
	0,0250		
	0,0230		
4	0,0310	$0,0330 \pm 0,0015$	38
	0,0350		
	0,0330		
5	0,0460	$0,0430 \pm 0,0031$	47,5
	0,0390		
	0,0440		

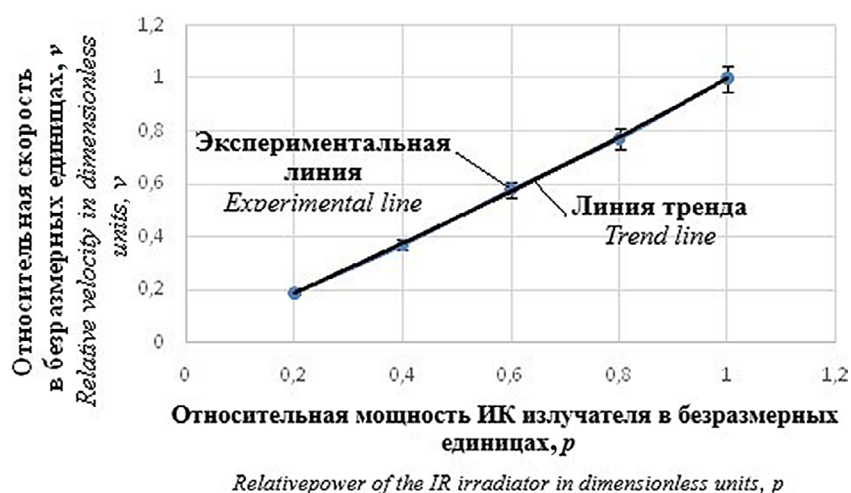


Рис. 4. Зависимость относительной скорости движения ленты конвейера от относительной мощности ИК-излучателя

Fig. 4. Relationship between the relative speed of the conveyor belt and the relative power of the IR irradiator

Относительная скорость движения ленты конвейера в безразмерных единицах –

$$v = \frac{V}{V_{\max}}, \quad (7)$$

где V – скорость движения ленты конвейера, мм/с; $V_{\max}$ – максимальная скорость движения ленты конвейера ($V_{\max} = 43$ мм/с).

Относительная мощность ИК излучателя в безразмерных единицах –

$$p = \frac{P}{P_{\max}}, \quad (8)$$

где P – текущая мощность ИК-излучателя, Вт; $P_{\max}$ – максимальная мощность ИК-излучателя ($P_{\max} = 47,5$ Вт).

Представленная зависимость позволила получить уравнение регрессии с инвариантными коэффициентами

$$v = 0,104p^3 - 0,044p^2 + 0,936p + 0,002 \quad (9)$$

и достоверностью аппроксимации, близкой к 1 ($R^2 = 0,999$) [9, 10].

Список источников

1. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А. и др. Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
2. Воложанинов С.С., Алдошин Н.В., Завалий А.А., Волобуев Д.Д. Экспериментальное исследование температурного поля в слое почвы при нагреве сверхвысокочастотным излучением // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 28-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>
3. Сторчевой В.Ф., Судник Ю.А., Мануйленко А.Н. Электрический озонатор-излучатель воздуха для сельскохозяйственных помещений: результаты исследований автономного модуля // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 5. С. 66-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-66-73>
4. Устройство для обеззараживания почвосмеси в тонком слое ИК-излучением на конвейере: Патент на полезную модель RU227192 U1, МПК A01M 17/00. Заявка № 2024108138; заявл. 28.03.2024; Оpubл. 11.07.2024 / И.Г. Поспелова, И.В. Возмищев, Т.А. Широкова и др. EDN: ADWMMME
5. Устройство для обеззараживания почвы: Патент на полезную модель RU208747 U1, МПК A01M 17/00. Заявка № 2021129373; заявл. 08.10.2021; Оpubл. 11.01.2022 / А.А. Завалий, Н.В. Алдошин, С.С. Воложанинов и др. EDN: RLEWNQ
6. Поспелова И.Г., Дородов П.В., Возмищев И.В. и др. Методика исследования обеззараживания ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере // АгроЭкоИнфо. 2023. № 6 (60). С. 34. EDN: ZDOSWO.
7. Дородов П.В., Поспелова И.Г., Возмищев И.В., Титов И.В. Применение инфракрасного нагрева при обеззараживании почвы в защищенном грунте и механизм распространения тепла // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 59-64. EDN: VTKZNA
8. Кабалоев Т.Х., Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного

Из данных рисунков 2, 3, 4 следует, что линии тренда находятся в доверительном интервале $\pm 5\%$ экспериментальных данных и с точностью аппроксимации 0,976...0,999.

Выводы

1. Обработка ИК-излучением почвосмеси в тонком слое на конвейере должна обеспечивать равномерный ее нагрев, не превышающий температуру $95 \pm 5^\circ\text{C}$ и максимальное обеззараживание. Для этого исследованы различные режимы обработки при толщине слоя 10...50 мм, высоте подвеса ИК-излучателя 50...250 мм, мощности ИК-излучателя 9,5...47,5 Вт.

2. Полученные на основе экспериментальных исследований уравнения регрессии с точностью аппроксимации 0,976...0,999 позволяют рассчитать рабочие режимы установок разных типоразмеров, в дальнейшем выполнить оптимизацию процесса обеззараживания почвосмеси ИК-излучением и реализовать его в техническом исполнении с системой автоматического управления.

References

1. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A. et al. Application of physical treatment methods for soil disinfection. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):32-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-32-37>
2. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliiy A.A. et al. Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(6):28-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>
3. Storchevoy V.F., Sudnik Yu.A., Manuilenko A.N. Electric ozonizer-air emitter for agricultural buildings: study results for an autonomous module. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(5):66-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-5-66-73>
4. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Shirobokova T.A. et al. IR irradiator for disinfecting soil mixture placed in a thin layer on a conveyor belt: Patent for Utility Model No. 227192 U1 Russian Federation, IPC A01M 17/00. No. 2024108138, 2024.
5. Zavaliiy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S. et al. Soil disinfection device: Patent for Utility Model No. 208747 U1 Russian Federation, IPC A01M 17/00. No. 2021129373, 2022.
6. Pospelova I.G., Dorodov P.V., Vozmishchev I.V. et al. Methodology for studying the disinfection of a soil mixture in a thin layer on a conveyor using IR radiation. *AgroEcoInfo*. 2023;6(60). (In Russ.)
7. Dorodov P.V., Pospelova I.G., Vozmishchev I.V. et al. The use of infrared heating in soil disinfection in protected ground and the mechanism of heat propagation. *Elektrotekhologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022;69(2):59-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-2-59-64>
8. Kabaloev T.Kh., Galueva K.K., Gokoev T.M. et al. Temperature field of greenhouse ground with thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorskoy State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
9. Dzanagov S.Kh., Kabaloev T.Kh. Soil disinfection in protected ground. *Zemledielie*. 2004;2:36-37. (In Russ.)

аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN

9. Дзанагов С.Х., Кабалоев Т.Х. Обеззараживание почвы в защищенном грунте // Земледелие. 2004. № 2. С. 36-37. EDN: PJNRAZ

Информация об авторах

¹ **Поспелова Ирина Геннадиевна**, канд. техн. наук, доцент; pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>; SPIN-код: 1625-0307, AuthorID: 547047

² **Ерохин Михаил Никитиевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884; SPIN-код: 3499-4405, AuthorID: 626708

³ **Дородов Павел Владимирович**, д-р техн. наук, профессор; pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>; SPIN-код: 9058-8125, AuthorID: 313983

⁴ **Казанцев Сергей Павлович**, д-р техн. наук, профессор; kazantsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022; SPIN-код: 4175-7998, AuthorID: 756509

⁵ **Возмищев Иван Владимирович**, старший преподаватель кафедры электротехники, vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>; SPIN-код: 6045-9160, AuthorID: 1064122

^{1,3} Удмуртский государственный аграрный университет; 246069, Российская Федерация, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

^{2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

⁵ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 246069, Российская Федерация, Удмуртская республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

Вклад авторов

И.Г. Поспелова – формулирование основной концепции исследований;

М.Н. Ерохин – разработка методологии исследований;

П.В. Дородов – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;

С.П. Казанцев – представление результатов, подготовка графических материалов;

И.В. Возмищев – проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.01.2025, после рецензирования и доработки 26.02.2025; принята к публикации 03.03.2025

Author Information

Irina G. Pospelova¹, DSc (Eng), Associate Professor; pospelovaig@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0009-0003-6458-9774>

Mikhail N. Erokhin², Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>, Scopus Author ID: 572092705884

Pavel V. Dorodov³, DSc (Eng), Professor, pvd80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>

Sergey P. Kazantsev⁴, DSc (Eng), Professor; kazantsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022

Ivan V. Vozmishchev⁵, Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering; vozm-ivan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9316-8252>

^{1,3} Udmurt State Agrarian University; 246069, Russia, Udmurt Republic, Izhevsk, Studencheskaya Str., 11.

^{2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49.

⁵ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 246069, Russia, Udmurt Republic, Izhevsk, Studencheskaya Str., 7.

Author Contribution

I.G. Pospelova – conceptualization;

M.N. Erokhin – research methodology;

P.V. Dorodov – formal analysis, validation, conclusions, writing – original draft;

S.P. Kazantsev – results and discussion, visualization;

I.V. Vozmishchev – investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 27.01.2025; Revised 26.02.2025; Accepted 03.03.2025