

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>

Экспериментальное исследование температурного поля в слое почвы при нагреве сверхвысокочастотным излучением

С.С. Воложанинов^{1✉}, Н.В. Алдошин², А.А. Завалий³, Д.Д. Волобуев⁴^{1,3,4}Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Россия²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>²naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>⁴volobyev99@mail.ru

Аннотация. Применение неионизирующего излучения в агропромышленном производстве представляет собой перспективное, экологически чистое альтернативное направление борьбы с вредителями, болезнями и сорняками. Основной целью исследований является разработка и внедрение технологий и устройств для его осуществления. В ходе исследований разработано устройство для обеззараживания почвы сверхвысокочастотным излучением, источником которого служат магнетроны с частотой излучения 2450 МГц и потребляемой мощностью 800...1000 Вт. Подвод энергии излучения к поверхности почвы осуществляется волноводом размером 90×60 мм. В качестве приемников СВЧ-излучения использовались картонные боксы с образцами почвы длиной 200 мм, шириной 50 мм и глубиной 100 мм. С помощью тепловизора Testo 882 определялось распределение температуры в слое почвы при воздействии устройства. Термографирование проводилось при влажности почвы 4, 10, 15 и 20%. С целью определения влияния на нагрев почвы отраженного излучения в слое почвы размещали алюминиевую пластину толщиной 1 мм. Выявлено, что при экспозиции 60 с слой почвы нагревается до 60...65°C на глубину 25...35 мм, до 40...45°C – на глубину 90...100 мм. При этом влажность почвы существенно не влияет на характер ее нагрева. Эффективность СВЧ-излучения и нагрева усиливается при размещении под слоем почвы металлической пластины, при этом до 87% расходуемой устройством энергии аккумулируется слоем почвы.

Ключевые слова: почва, СВЧ-излучение, нагрев, устройство для обеззараживания почвы, термографирование, эффективность СВЧ-излучения

Для цитирования: 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>

ORIGINAL ARTICLE

Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation

S.S. Volozhaninov^{1✉}, N.V. Aldoshin², A.A. Zavaliy³, D.D. Volobuev⁴^{1,3,4}V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia²Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>²naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>⁴volobyev99@mail.ru

Abstract. The use of non-ionizing radiation in agro-industrial production is a promising environmentally friendly alternative solution for pest, disease and weed control. The main purpose of the research is the development and use of technologies and devices for its implementation. In the course of the study, a device was developed to disinfect the soil with ultrahigh-frequency radiation, the source of which is magnetrons with a radiation frequency of 2450 MHz and a power consumption of 800 to 1000 watts. The radiation energy is applied to the soil surface by a waveguide measuring 90 × 60 mm. Cardboard boxes with soil samples 200 mm long, 50 mm wide and 100 mm deep were used as microwave radiation receivers. The thermal imager Testo 882 was used to determine the temperature distribution

in the soil layer operated by to the device. Thermography was performed at soil humidity of 4, 10, 15 and 20%. In order to determine the effect of reflected radiation on soil heating, an aluminum plate with a thickness of 1 mm was placed in the soil layer. The study revealed that at an exposure of 60 s, the soil layer heats up to 60 to 65°C to a depth of 25 to 35 mm, to 40 to 45°C to a depth of 90 to 100 mm. At the same time, soil moisture does not significantly affect its heating rate. The efficiency of microwave radiation and heating is still higher when a metal plate is placed under the soil layer, while up to 87% of the energy consumed by the device is accumulated by the soil layer.

Keywords: soil, microwave radiation, heating, soil disinfection device, thermography, microwave radiation efficiency

For citation: Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliy A.A., Volobuev D.D. Experimental study of the temperature field in the soil layer when heated by ultrahigh frequency radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):28-35. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-28-35>

Введение

При возделывании сельскохозяйственных культур альтернативой химическим методам борьбы с вредителями, болезнями и сорной растительностью является обработка почвы неионизирующим излучением [1-6].

Сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон неионизирующего излучения характеризуется тепловым и специфическим, или олиготермическим, деструктивным действием на биологические объекты¹ [7], что позволяет использовать его для угнетения паразитов, патогенной микрофлоры и сорных растений. Основными факторами воздействия СВЧ-излучения на биологические объекты являются частота, поток энергии на единицу обрабатываемой поверхности и экспозиция СВЧ-излучения на объект обработки.

Авторами разработано устройство для обеззараживания почвы сверхвысокочастотным излучением [8]. Необходимо провести оценку эффективности его использования.

Цель исследований: экспериментальное определение эффективности теплового воздействия разработанного устройства для обеззараживания поверхностного слоя почвы сверхвысокочастотным излучением при частоте излучения магнетронов 2450 МГц и потребляемой мощности 800...1000 Вт.

Материалы и методы

Схема устройства для обеззараживания поверхностного слоя почвы сверхвысокочастотным излучением представлена на рисунке 1.

Основными элементами устройства являются магнетрон 3 с излучающей антенной и волновод 2, представляющий собой металлическую тонкостенную трубку прямоугольного сечения размером 90×60 мм длиной 225 мм, размещенный в корпусе 1. К корпусу 1 крепятся трансформатор 5, конденсатор 6, предохранитель 7, вентилятор 4 для охлаждения магнетрона. Электропитание устройства

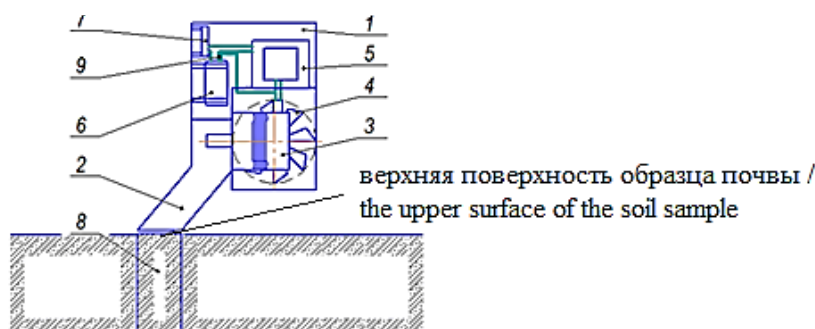


Рис. 1. Устройство для обеззараживания поверхностного слоя почвы. Принципиальная схема:

1 – корпус; 2 – волновод; 3 – магнетрон; 4 – вентилятор; 5 – трансформатор; 6 – конденсатор; 7 – предохранитель; 8 – бокс с образцом почвы; 9 – соединительные провода

Fig. 1. Device for disinfection of the surface layer of the soil. Schematic diagram:

1 – housing; 2 – waveguide; 3 – magnetron; 4 – fan; 5 – transformer; 6 – capacitor; 7 – fuse; 8 – box with a soil sample; 9 – connecting wires

¹Бородин И.Ф. Применение сверхвысокой частоты в сельском хозяйстве // Электричество. 1989 № 6. С. 1-8; Бородин И.Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве: Обзорная информация / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. Горин; Госагропром СССР; Всесоюзная ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени академия сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина; Всесоюзный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований агропромышленного комплекса. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований агропромышленного комплекса, 1987. 56 с. (Механизация и электрификация сельского хозяйства). EDN: RWLTUP.

осуществляется от электрической сети переменного тока напряжением 220 В.

В качестве приемников СВЧ-излучения использовались картонные боксы, заполненные образцами почвы, длиной 200 мм, шириной 50 мм и глубиной 100 мм (рис. 2). Боковая стенка бокса выполнена откидной, открываемая поверхность образца почвы подлежит термографированию для определения распределения температуры по глубине слоя почвы. С целью определения влияния на нагрев почвы отраженного излучения на дне бокса установлена алюминиевая пластина толщиной 1 мм.

Регистрация температурного поля боковой поверхности образца почвы 3 выполнялась тепловизором Testo 882 с термочувствительной матрицей размером 320×240 пикселей с разрешающей способностью 0,06°C. Обработка цифровых термограмм, полученных тепловизором, осуществлялась в приложениях MS Excel и Mathcad. Влажность почвы определяли в соответствии с ГОСТ 28268-89 с использованием аналитических весов ВЛТЭ-510, сушильного шкафа и эксикатора. Температура и влажность атмосферного воздуха определялись комбинированным прибором ТА298.

Расход электрической энергии при работе устройства фиксировался однофазным счетчиком электрической энергии СЕ101. Время работы устройства регистрировали электронным секундомером С-01.

В исследованиях использовалась почва, относящаяся к черноземам южным мицеллярно-карбонатным, развитым на красно-бурых глинах² [9, 10].

Методика выполнения эксперимента по определению распределения энергии излучения включает в себя следующую очередность операций: определение исходной влажности почвы; регистрация температуры и влажности в помещении; размещение боксов с почвой под срезом волновода 2 (рис. 1); включение магнетрона с заданной экспозицией (30 или 60 с); размещение бокса с образцом почвы в фокусе тепловизора Testo 882; открытие боковой крышки бокса и регистрация температуры боковой поверхности образца почвы тепловизором Testo 882; обработка термограмм тепловизора в приложениях MS Excel и Mathcad.

Условия проведения эксперимента: влажность почвы – 4%; влажность в помещении – 56%; температура воздуха в помещении – 17,3°C; средняя температура боковой поверхности образцов почвы перед нагревом – 18,4°C; время экспозиции – 30 и 60 с.

² Почвоведение: Учебник для университетов: В 2 ч. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г.Д. Белицина, В.Д. Высылевская, Л.А. Гришина и др.; Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.

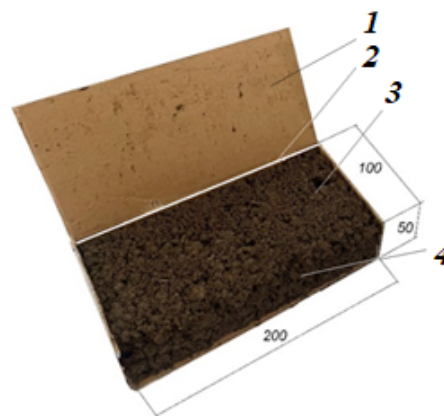


Рис. 2. Бокс с почвой:

- 1 – откидная боковая стенка бокса;
- 2 – алюминиевая пластина;
- 3 – боковая поверхность образца почвы;
- 4 – верхняя поверхность образца почвы

Fig. 2. Box with the soil:

- 1 – folding side wall of the box; 2 – aluminium plate;
- 3 – lateral surface of the soil sample;
- 4 – upper surface of the soil sample

Эксперименты выполнялись в 7 повторностях, нагрев каждого образца почвы фиксировался тепловизором трижды с периодом между снимками не более 5 с.

Исследование распределения энергии излучения в зависимости от влажности почвы выполнено с применением экспериментальной установки (рис. 1), термографирование осуществлялось при влажности почвы 4, 10, 15 и 20%. Условия проведения: бокс без металлической пластины, влажность в помещении 56%, температура воздуха 17,3°C, время экспозиции 30 и 60 с.

Результаты и их обсуждение

Термограмма боковой поверхности образцов почвы в боксе с металлической пластиной и без нее, а также сравнение температур образцов почвы вдоль осевой линии волновода представлены на рисунке 3.

Анализ экспериментальных данных с использованием критерия Фишера показал существенное различие значений температур при использовании с металлической пластиной и в случае ее отсутствия.

Как следует из термограмм (рис. 3а), зона нагрева образца почвы ограничена шириной волновода, равной 90 мм. При этом максимальное значение температуры образца почвы 40°C достигает при экспозиции 30 с, 74°C – при 60 с. Использование металлической пластины при экспозиции в диапазоне 30...60 с позволяет увеличить максимальную температуру нагрева образца почвы на 4,6...8,5%.

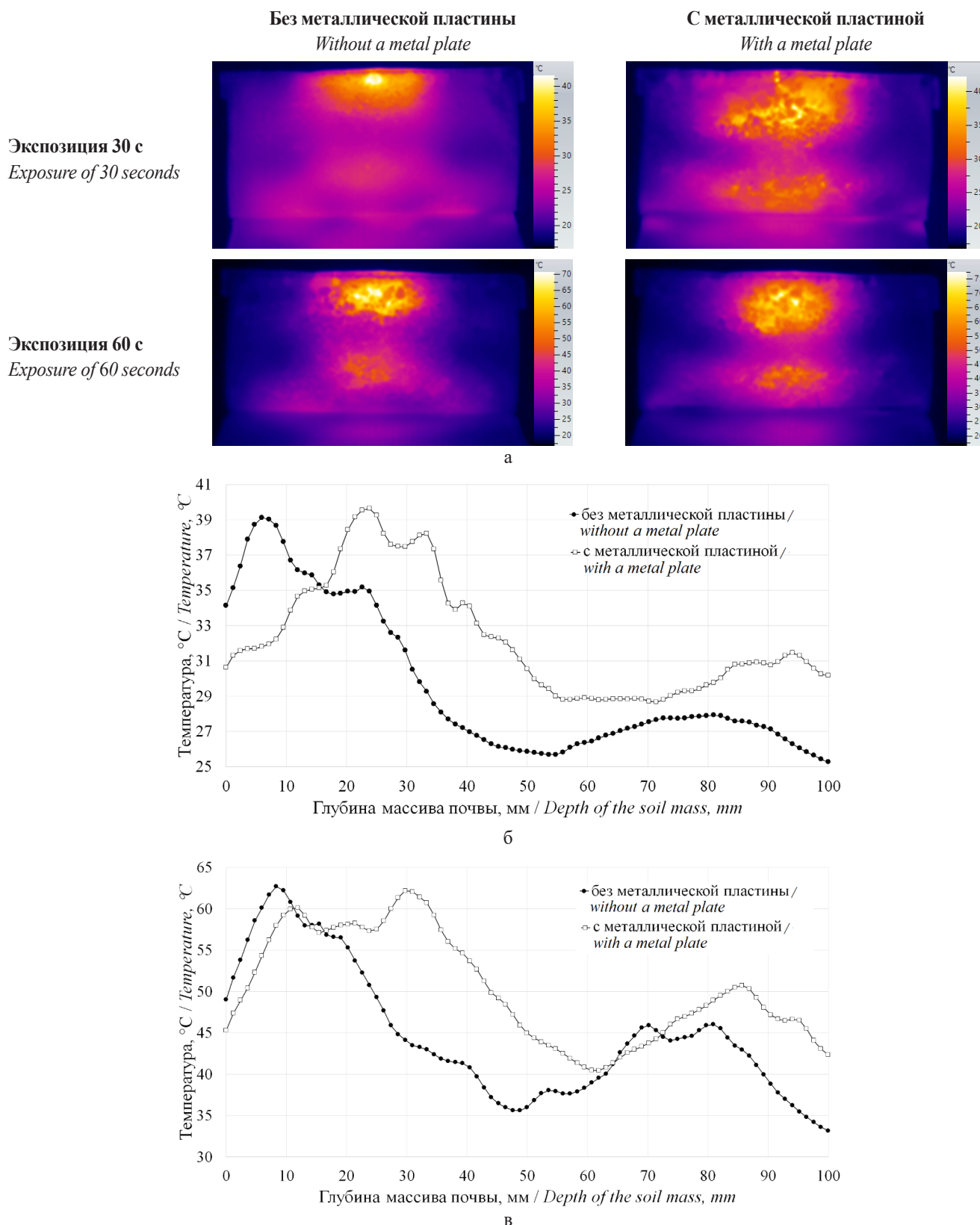


Рис. 3. Результаты термографирования боковой поверхности образцов почвы в боксе (а) и сравнение температур образцов почвы вдоль осевой линии волновода при экспозиции 30 с (б) и 60 с (в)
Fig. 3. Results of thermography of the lateral surface of soil samples in the box (a) and comparison of the temperatures of soil samples along the centerline of the waveguide at an exposure of 30 c (b) and 60 c (c)

Анализ термограмм и сравнение температур образцов почвы вдоль осевой линии волновода (рис. 3 б, в) показали, что температура почвы выше 40°С наблюдается при экспозиции 60 с и отсутствии металлической пластины на глубине около 40 мм, а в боксе с металлической пластиной – по всей глубине. Эффект усиления термического действия СВЧ-излучения на образец почвы при использовании металлической пластины объясняется отражением от нее излучения, проходящего сквозь образец почвы, и его поглощения почвой.

Оценка полноты поглощения образцом почвы энергии СВЧ-излучателя (оценка энергоэффективности) с металлической пластиной и без нее осуществлялась сравнением затраченной энергии СВЧ-излучателя, измеренной счетчиком электроэнергии, и расчетного значения поглощенной теплоты образцом почвы в предположении одинаковости нагрева слоя почвы по его ширине при следующих исходных данных:

- обрабатываемый объем почвы – $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;
- удельная теплоемкость воды – 4200 Дж/кг · К;

- удельная теплоемкость почвы – 900 Дж/кг · К;
- плотность почвы – $2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Результат сравнения затраченной энергии и поглощенной теплоты представлен в таблице 1.

Установлено, что до 87% затраченной энергии передается СВЧ-излучением в обрабатываемую почву, что говорит о высокой эффективности обеззараживания почвы. Целесообразно использовать при обработке почвы СВЧ-излучением погруженный в слой почвы металлический отражатель. Техническое решение мобильного агрегата для обработки почвы электромагнитным излучением СВЧ с использованием металлического отражателя представлено в описании патента [8].

Исследование распределения энергии излучения выполнялось в боксе без металлической пластины при влажности почвы 4, 10, 15 и 20%. Изменение температуры боковой поверхности образца почвы в боксе и температуры вдоль осевой линии волновода представлено в таблице 2.

Оценка энергоэффективности при обработке почвы СВЧ-излучением

Table 1

Assessment of energy efficiency in soil treatment with microwave radiation

Условия Conditions		Разность исходной температуры и после нагрева, °С Difference between the initial temperature and after heating, °C	Затраченная энергия, Дж (Вт·ч) Energy consumed, J (W·h)	Расчетное значение поглощенной теплоты, Дж (Вт·ч) Calculated value of the absorbed heat, J (W·h)
Бокс без металлической пластины Box without a metal plate	Экспозиция 30 с / Exposure of 30 seconds	5,4	32400 (9)	20385 (5,6)
	Экспозиция 60 с / Exposure of 60 seconds	12,1	64800 (18)	46026 (12,8)
Бокс с металлической пластиной Box with a metal plate	Экспозиция 30 с / Exposure of 30 seconds	6,8	32400 (9)	25872 (7,2)
	Экспозиция 60 с / Exposure of 60 seconds	14,9	64800 (18)	56725 (15,8)

Анализ повышения температуры почвы

Table 2

Analysis of soil temperature rise

Влажность почвы, % Soil moisture, %	Экспозиция, с Exposure, seconds	Изменение температуры боковой поверхности образца почвы в боксе, °С Change in the temperature of the lateral surface of the soil sample in the box, °C			Температура образца почвы вдоль осевой линии волновода, °С Temperature of the soil sample along the centerline of the waveguide, °C		
		min	max	среднее / average	max	min	среднее / average
4	30	0,1	22,1	5,4	6,1	21,9	10,3
	60	1,2	48,6	12,1	12,5	45,8	25,0
10	30	1,2	24,6	6,7	6,6	23,7	14,6
	60	1,6	56,0	14,0	12,3	55,7	31,4
15	30	1,2	32,1	7,5	6,2	30,0	17,2
	60	1,5	54,0	13,9	12,0	53,5	32,0
20	30	0,8	29,7	7,7	5,7	29,8	17,7
	60	0,8	53,7	14,6	9,1	53,9	34,0

Данные таблицы 2 позволяют сделать вывод о том, что изменение влажности существенно не влияет на максимальную температуру нагрева. При построении поверхностей распределения температуры по боковой поверхности образца почвы в боксе установлено, что подаваемая энергия аккумулируется почвой одинаково независимо от влажности (рис. 4). Этот вывод основан на относительном равенстве сумм температур отдельно взятых поверхностей. При экспозиции 30 с и влажности 4% сумма температур составляет $4,928 \cdot 10^5$, при 10% – $4,962 \cdot 10^5$,

при 15% – $4,955 \cdot 10^5$, при 20% – $4,979 \cdot 10^5$. При экспозиции 60 с и влажности 4% сумма температур составляет $6,094 \cdot 10^5$, при 10% – $6,349 \cdot 10^5$, при 15% – $6,38 \cdot 10^5$, при 20% – $6,383 \cdot 10^5$.
Изменение температуры боковой поверхности образца почвы влажностью 15% исследовалось с течением времени после воздействия СВЧ-излучения в отсутствии металлической пластины при влажности в помещении 37%, температуре воздуха 21°C и экспозиции 60 с. На рисунке 5 представлены результаты анализа термограмм боковой поверхности

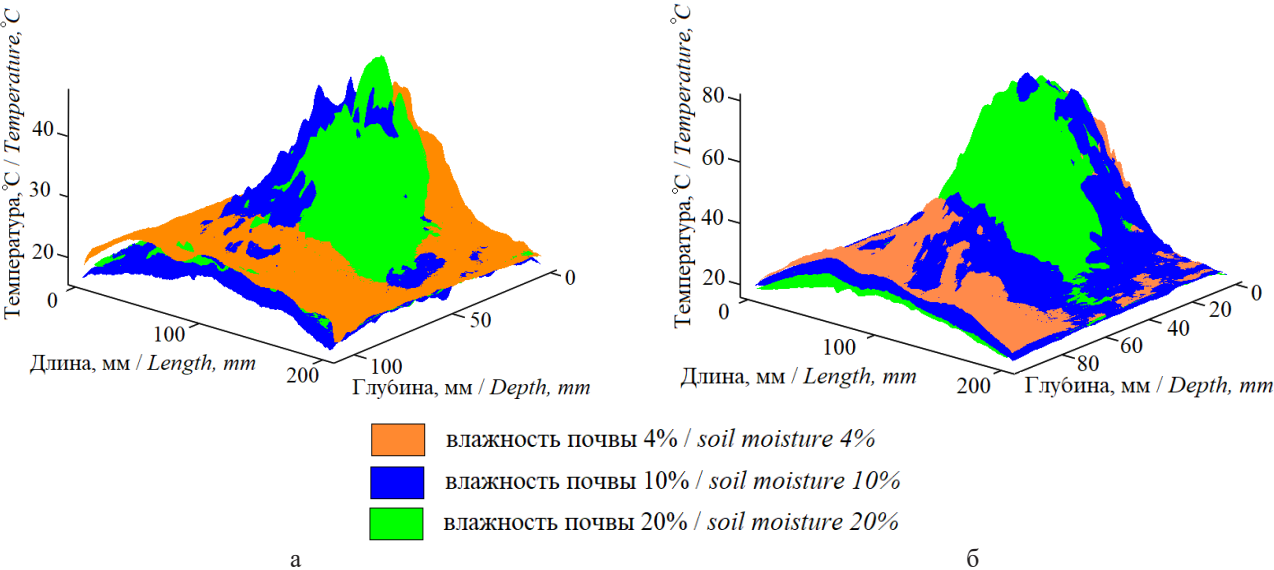


Рис. 4. Поверхность распределения температуры при влажности почвы 4, 10 и 20%:
а – экспозиция 30 с; б – экспозиция 60 с

Fig. 4. Temperature distribution surfaces with a soil moisture of 4%, 10%, and 20%:
a – exposure of 30 s; b – exposure of 60 s

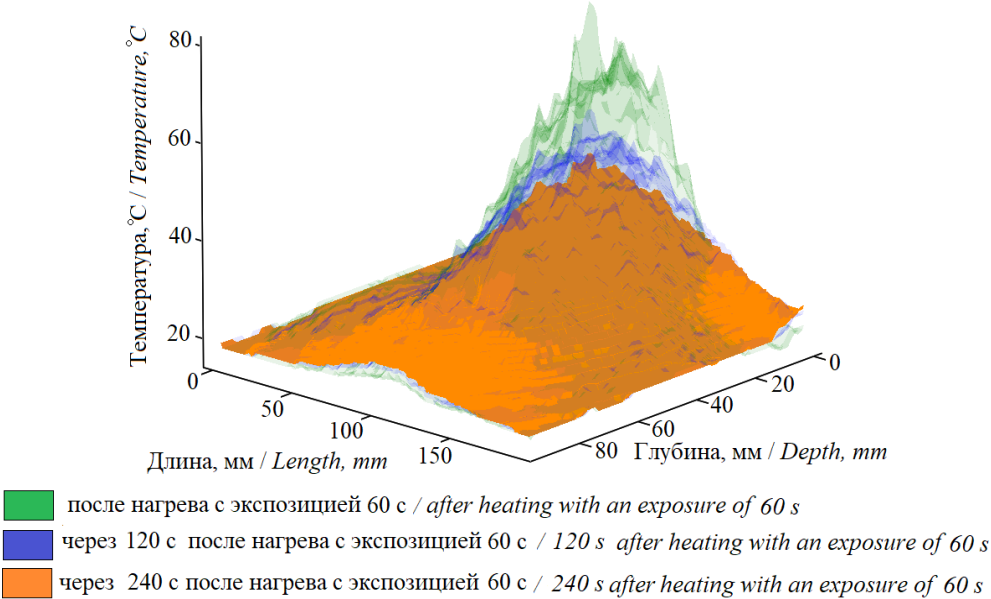


Рис. 5. Анализ термограмм динамики изменения температуры боковой поверхности образца почвы в боксе с течением времени после воздействия СВЧ-излучения

Fig. 5. Analysis of temperature dynamics of the lateral surface of the soil sample in the box over time after exposure to microwave radiation

образца почвы в боксе, зарегистрированных в течение 4 мин после нагрева. Установлено, что после воздействия СВЧ-излучения на почву со временем зона нагрева увеличивается незначительно по отношению к зоне, подвергшейся обработке. При этом зона нагрева образца почвы ограничена шириной волновода, равной 90 мм. Следовательно, при проектировании машин необходимо располагать СВЧ-излучатели с учетом сплошной обработки для обеззараживания почвы по всей ширине захвата машины.

Список источников

1. Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 2. С. 173-187. EDN: YHESKL
2. Хамуков Ю.Х., Канокова М.А. Земледелие и вспашка. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 225-235. EDN: VHSXQV
3. Никишина О.В., Морозов Г.А. Комбинированные методы обработки почв // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 2. С. 51-55. EDN: LNRICH
4. Способ СВЧ-обработки почвы и устройство для его осуществления: Пат. RU2017145738 A: A01B 47/00 / А.А. Гаврилова [и др.]. № 2017145738; заявл. 25.12.2017; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 18.
5. Устройство для обеззараживания почвы ИК-излучением: Пат. RU197880 U1 / И.Г. Пospelova, И.В. Возмищев, А.М. Ниязов, И.М. Новоселов; № 2019141928; заявл. 13.12.2019; опубл. 03.06.2020, Бюл. № 16. EDN: EQQKJP
6. Устройство для обеззараживания почвы с механической обработкой: Пат. RU № 205568 U1 / И.Г. Пospelova, И.В. Возмищев, И.Р. Владыкин, Р.Р. Шакиров, Н.П. Кондратьева; № 2021111346; заявл. 20.04.2021; опубл. 21.07.2021, Бюл. № 21. EDN: PVKGKP
7. Андреев С.А., Уманский П.М. Новая технология СВЧ-обработки почвы // Природообустройство. 2018. № 4. С. 111-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-4-111-116>
8. Мобильный агрегат для обработки почвы электромагнитным излучением СВЧ: Пат. RU № 226744 U1 / А.А. Завалий, Н.В. Алдошин, С.С. Воложанинов, В.С. Рутенко, Д.Д. Волобуев; заявл. 22.04.2024; опубл. 19.06.2024, Бюл. № 17. EDN: KEQWUG
9. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. EDN: IZUIQD
10. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1 (64). С. 28-35. EDN: SLJVKYK

Выводы

1. Высокая эффективность СВЧ-излучения при обеззараживании почвы разработанным устройством обусловлена передачей большей доли затраченной энергии (87%) и использовании металлического отражателя.
2. Максимальные значения температуры образцов почвы 40 и 74°C достигаются, соответственно, при экспозиции 30 и 60 с.
3. Влажность почвы существенно не влияет на максимальную температуру ее нагрева.
4. СВЧ-излучатели для обеззараживания почвы необходимо располагать по всей ширине захвата машины.

References

1. Molodtsova M.A., Sevastyanova Yu.V. Opportunities and prospects of using microwave radiation in industry (review). *Russian Forestry Journal*. 2017;2:173-187. (In Russ.)
2. Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A. Arable farming and plowing. Plowing as an anthropogenic factor of ecosystem degradation. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022;6:225-235. (In Russ.)
3. Nikishina O.V., Morozov G.A. Combined soil treatment methods. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022;2(2):51-55. (In Russ.)
4. Gavrilova A.A. etc. Method of microwave tillage and a device for its implementation: patent RU2017145738: A01B47/00. No. 2017145738, 2019. (In Russ.)
5. Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Niyazov A.M., Novoselov I.M. Device for soil disinfection IR-radiation: patent RU197880 U1, 2020. (In Russ.)
6. Pospelova I.G., Vospishchev I.V., Vladyskin I.R., Shakhov R.R., Kondratieva N.P. Device for soil disinfection with mechanical treatment: patent RU No.205568, 2021. (In Russ.)
7. Andreev S.A., Umansky P.M. New technology of soil microwave treatment. *Prirodoobustroystvo*. 2018;4:111-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-4-111-116> (In Russ.)
8. Zavaliy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S., Rutenko V.S., Volobuev D.D. Mobile unit for soil treatment with microwave electromagnetic radiation: patent RU226744, 2024. (In Russ.)
9. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (In Russ.)
10. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(1):28-35. (In Russ.)

Сведения об авторах

Сергей Сергеевич Воложанинов^{1✉}, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин; s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232

Николай Васильевич Алдошин², д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022

Алексей Алексеевич Завалий³, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин; zavalyim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527

Дмитрий Дмитриевич Волобуев⁴, аспирант кафедры общетехнических дисциплин; volobuev99@mail.ru

^{1,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Вклад авторов

С.С. Воложанинов – проведение исследований, описание результатов и формирование выводов исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;

Н.В. Алдошин – концептуализация;

А.А. Завалий – методология, научное руководство;

Д.Д. Волобуев – обзор источников литературы, подготовка графических материалов, проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 12.07.2024; поступила после рецензирования и доработки 11.10.2024; принята к публикации 14.10.2024

Authors Information

Sergey S. Volozhaninov^{1✉}, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Technical Subjects, s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232

Nikolay V. Aldoshin², DSc (Eng), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Tillage and Reclamation Machines; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Author ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022

Aleksey A. Zavaliy³, DSc (Eng), Associate Professor, the head of the department of «All-technical disciplines», zavalyim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527

Dmitry D. Volobuev⁴, postgraduate student of Department of General Technical Subjects; volobuev99@mail.ru
^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4 Akademika Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Republic of Crimea, Russian Federation

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Author Contribution

S.S. Volozhaninov – investigation, formulation of results and conclusions, writing – original draft preparation, writing – revising and editing of the manuscript;

N.V. Aldoshin – conceptualization;

A.A. Zavaliy – methodology, research methodology;

D.D. Volobuev – literature review, visualization, investigation.

Conflict of interests

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

Received 12.07.2024; Revised 11.10.2024; Accepted 14.10.2024.