

УДК 632.08

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

# **РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ СВЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СЛОЯ ПОЧВЫ**

Воложанинов Сергей Сергеевич

канд. техн. наук, доцент

РИНЦ SPIN-код: 1333-7600

Scopus Author ID: 57218094232

ID РИНЦ: 891361

ORCID: 0000-0002-6686-1220

s.volozhaninov@mail.ru

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

Алдошин Николай Васильевич

д-р. техн. наук, профессор, главный научный  
сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и  
мелиоративных машин

РИНЦ SPIN-код: 6032-9021

Scopus Author ID: 57194131298

ID РИНЦ: 593777

ORCID: 0000-0002-0446-1096

Researcher ID: AAD-6548-2022

naldoshin@yandex.ru

*ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный  
центр ВИМ; г. Москва, Россия*

Завалий Алексей Алексеевич

д-р. техн. наук, доцент

РИНЦ SPIN-код: 3604-5109

Scopus Author ID: 57214120527

ID РИНЦ: 784509

ORCID: 0000-0002-0806-1110

zavalym@mail.ru

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

Волобуев Дмитрий Дмитриевич

ID РИНЦ: 1062300

volobyev99@mail.ru

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный  
университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, Россия*

С использованием программной платформы для моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics выполнен анализ геометрии и режимов работы СВЧ-излучателя для теплового обеззараживания почвы. В качестве источника СВЧ излучения выбран магнетрон с рабочей частотой 2,45 ГГц потребляемой мощностью 1 кВт. В результате сравнения четырёх форм

UDC 632.08

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

# **COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A MICROWAVE EMITTER FOR THERMAL DISINFECTION OF THE SOIL LAYER**

Volozhaninov Sergey Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

RSCI SPIN code: 1333-7600

Scopus Author ID: 57218094232

RSCI ID: 891361

ORCHID: 0000-0002-6686-1220

s.volozhaninov@mail.ru

*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

Aldoshin Nikolay Vasilyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief  
Researcher of the Laboratory of Tillage and  
Reclamation Machines

RSCI SPIN code: 6032-9021

Scopus Author ID: 57194131298

RSCI ID: 593777

ORCID: 0000-0002-0446-1096

Researcher ID: AAD-6548-2022

naldoshin@yandex.ru

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM;  
Moscow, Russia*

Zavaliy Alexey Alekseevich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

RSCI SPIN code: 3604-5109

Scopus Author ID: 57214120527

RSCI ID: 784509

ORCID: 0000-0002-0806-1110

zavalym@mail.ru

*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

Volobuev Dmitry Dmitrievich

RSCI ID: 1062300

volobyev99@mail.ru

*FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal  
University», Simferopol, Russia*

Using the COMSOL Multiphysics software platform for modeling physical processes, the geometry and operating parameters of a microwave emitter for thermal disinfection of soil were analyzed. A magnetron with an operating frequency of 2.45 GHz and a power consumption of 1 kW was chosen as the microwave radiation source. As a result of comparing four waveguide shapes, a waveguide in the form of

волноводов для теплового воздействия на слой почвы выбран волновод в виде наклонного канала, анализ теплового воздействия которого на слой почвы толщиной 100 мм размерами в плане 60x88 мм показал, что при нагреве в течение 60 с среднеобъемная температура слоя почвы составляет от 45 °C до 60 °C при максимальной температуре в объеме почвы от 110 °C до 200 °C при влажности почвы от 5 до 20%. Наличие зазора между поверхностью почвы и срезом волновода СВЧ-излучателя от 5 до 20 мм не снижает нагрев слоя почвы. Лучшие показатели нагрева слоя почвы для всего диапазона исследуемых свойств почвы и высоты слоя воздуха между срезом излучателя и поверхностью почвы соответствуют почве влажностью 10 %

Ключевые слова: ТЕМПЕРАТУРА, СЛОЙ ПОЧВЫ, СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ, ВОЛНОВОД

an inclined channel was selected for thermal action on the soil layer. Analysis of the thermal effect of this channel on a 100 mm thick soil layer measuring 60x88 mm in plan showed that when heated for 60 seconds, the average volume temperature of the soil layer ranges from 45 °C to 60 °C at a maximum temperature in soil volume ranges from 110 °C to 200 °C with soil moisture from 5 to 20%. The presence of a gap between the soil surface and the section of the microwave emitter waveguide from 5 to 20 mm does not reduce the heating of the soil layer. The best indicators of heating of the soil layer for the entire range of studied soil properties and the height of the air layer between the radiator section and the soil surface correspond to soil with a humidity of 10%

Keywords: TEMPERATURE, SOIL LAYER, MICROWAVE RADIATION, WAVEGUIDE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-213-005>

**Введение.** Обеззараживание почвы физическими методами, не загрязняющими окружающую среду экологически опасными химическими соединениями, является актуальной альтернативой химическим методам обеззараживающей обработки почвы [1 - 5].

Известными недостатками физических методов, использующих воздействие на почву механической или тепловой энергией, электрическим током и электромагнитным излучением, являются техническая сложность, низкая энергетическая эффективность и высокий уровень неравномерности воздействия на почву [1, 6, 7].

Среди физических методов обеззараживания почвы выгодно отличается воздействие на слой почвы СВЧ излучением. СВЧ излучение проникает в глубину слоя почвы, обладает угнетающим действием на широкий спектр микроорганизмов, яйца и личинки насекомых, имеет малые по сравнению с другими тепловыми методами обработки потери энергии, так как вся сгенерированная энергия излучения попадает внутрь слоя почвы [8 - 10].

**Целью настоящей работы** является выбор геометрии волновода СВЧ излучателя, обеспечивающего требуемый уровень нагрева с наибольшей

равномерностью по объёму слоя почвы.

**Методика исследования.** В качестве инструмента исследования использована программная платформа для моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics. Для решения задачи нагрева тел электромагнитным излучением используют волновое уравнение Максвелла [11 - 14]:

$$\left(g_{ph}^2 \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) E = 0; \quad \left(g_{ph}^2 \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) B = 0; \quad g_{ph}^2 = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряжённость электрического поля, В/м;  $B$  – напряжённость магнитного поля, А/м;  $g_{ph}$  – фазовая скорость или скорость света в среде, м/с;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, уравнение рассеяния энергии из-за диэлектрических потерь в почве:

$$q_V = 0,5\omega\epsilon_0\epsilon_r''|E|^2, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота, рад/с;  $f$  – частота электромагнитного поля, Гц;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\epsilon_r''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости;  $E$  – вектор напряженности электрического поля, В/м, и уравнение теплопереноса в рассматриваемом теле:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = q_V, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/кг×°С;  $T$  – температура, °С;  $t$  – время, с;  $u$  – вектор скорости перемещения почвы относительно источника теплоты, м/с;  $q$  – вектор плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

**Результаты исследования.** Для анализа приняты 4 формы волноводов СВЧ-излучателей: прямоугольный волновод, рупорный волновод, комбинированный волновод и волновод с наклонным каналом (см. рис. 1, 2). Для всех волноводов источниками СВЧ-излучения служат либо верхняя стенка волновода (поз. 1), либо цилиндрическая антенна магнетрона (поз. 2) на рисунках 1 и 2.

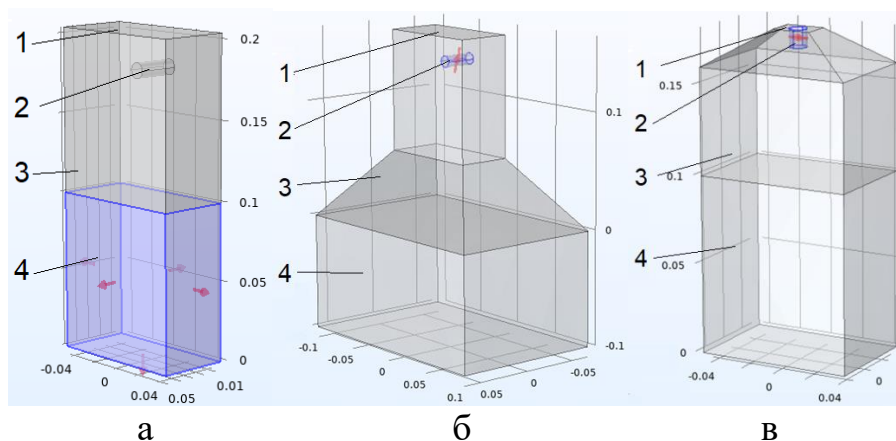


Рисунок 1 – Прямоугольный волновод (а), рупорный волновод (б), комбинированный волновод (в)

На рисунке 1 и 2 обозначены также стенки волновода, выполненные из конструкционной стали (поз. 3) и слой почвы (поз. 4). Для прямоугольного волновода размеры поверхности слоя почвы 91,8 мм×45,9 мм, глубина слоя – 100 мм.

Расчёт геометрии рупорного волновода выполнен по методике [15] для исходных данных: центральная частота  $f = 2450$  МГц, длина волны  $\lambda = 122$  мм, усиление антенны относительно изотропного излучателя 12 дБ, входной импеданс антенны  $Z_0 = 50$  Ом. Размеры поверхности слоя почвы 201 мм × 134 мм, глубина слоя – 100 мм.

В комбинированном волноводе размеры прямоугольного канала 60×88×60 мм. Высота усечённой пирамиды 20 мм, размеры верхней плоскости пирамиды 22×16 мм. Высота стержня антенны магнетрона 10 мм. Размеры поверхности слоя почвы 88 мм × 60 мм, глубина слоя – 100 мм.

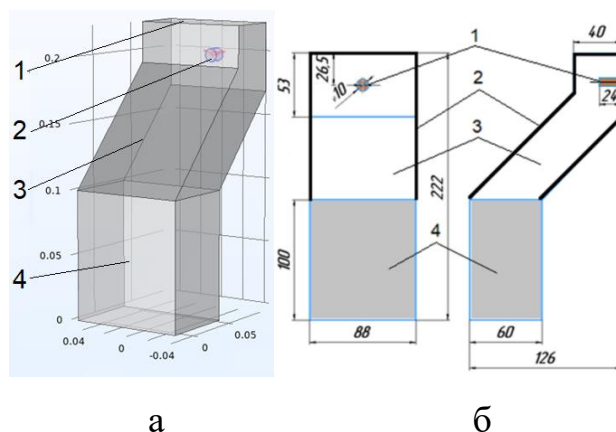


Рисунок 2 – Волновод с наклонным каналом (а); проекционный чертёж излучателя с волноводом с наклонным каналом (б): 1 – источник СВЧ-излучения; 2 – стенки камеры волновода; 3 – воздух; 4 – почва

Параметрами сравнения форм волноводов СВЧ-излучателей приняты среднеобъёмное значение температуры слоя почвы при экспозиции СВЧ-излучения длительностью 60 с; средние и максимальные значения температуры контрольных поверхностей слоя почвы; локализация зон нагрева в слое почвы. Анализ локализация зон нагрева в слое почвы показал, что характер распределения температуры в объёме слоя почвы сходны для источников СВЧ-излучения типа антенна магнетрона (Lumped Port) и поверхность (Rectangular Port). Существенное различие в распределении температуры наблюдается для комбинированного волновода; наклонный волновод и рупорный волновод концентрируют зону повышенного нагрева в центральной части массива почвы и у передней стенки массива, прямоугольный волновод интенсивнее нагревает пристеночные области слоя почвы. На рисунке 3 представлены значения средних и максимальных значений температуры горизонтальных сечений слоя почвы на поверхности и глубине 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм для вариантов использования портов СВЧ-излучения типа антенна магнетрона (Lumped Port) и поверхность (Rectangular Port).

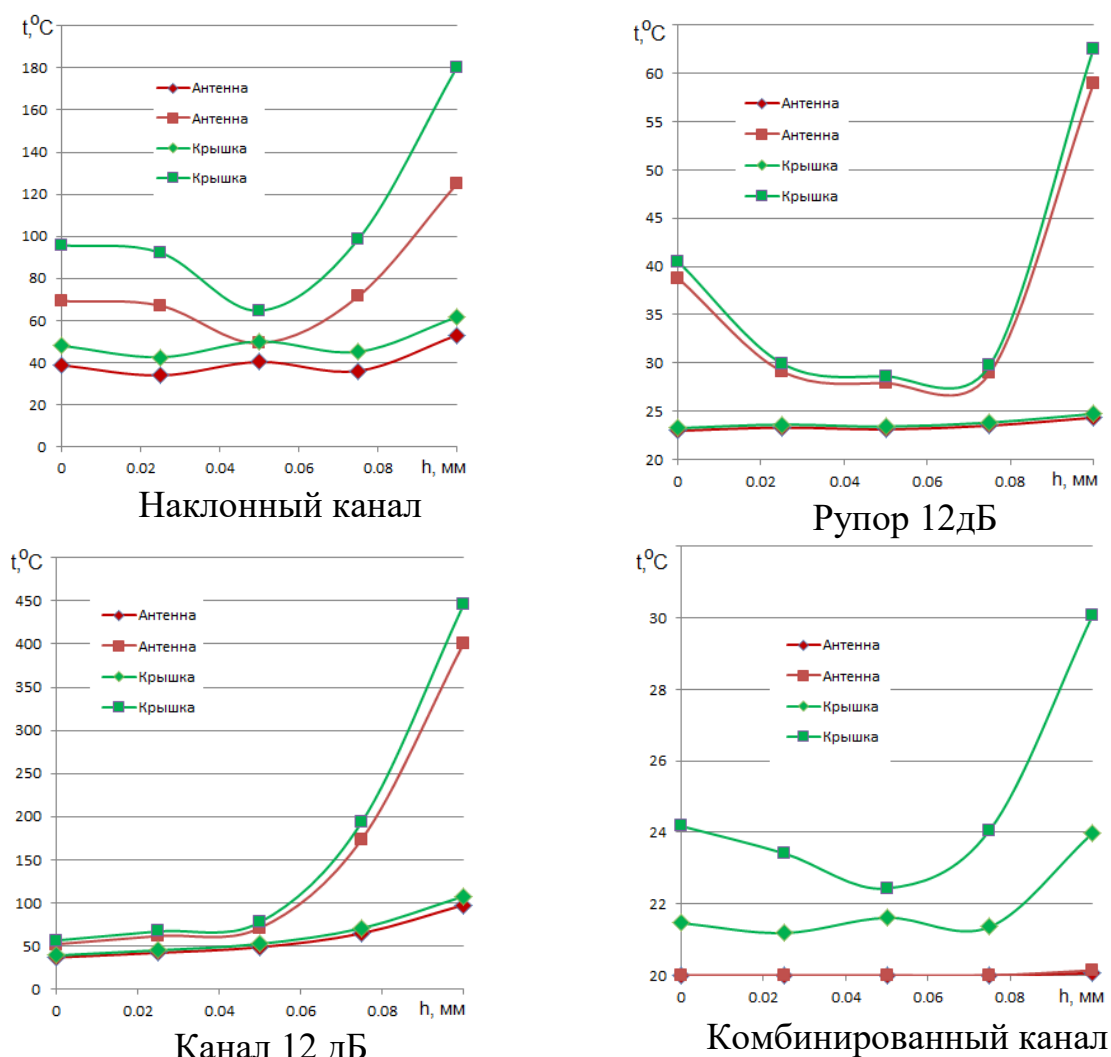


Рисунок 3 – Средние и максимальные значения температуры горизонтальных сечений слоя почвы

Из графиков следует, что наибольшей равномерностью распределения температуры по объёму слоя почвы обладают СВЧ-излучатели с наклонным волноводом и рупорным волноводом. Комбинированный канал практически не приводит к разогреву объёма слоя почвы. Использование при моделировании порта поверхность (Rectangular Port) даёт более высокие значения температуры по сравнению с моделями, использующими порт типа антенна магнетрона (Lumped Port).

На рисунке 4 приведены среднеобъёмные (а) и максимальные (б) по объёму слоя почвы температуры для рассматриваемых схем волноводов. Более низкие значения температуры при использовании рупорного волновода (Рупор 12дБ) связаны с существенно большей площадью

поверхности и, соответственно, объёма слоя почвы, который превышает объём для волновода с наклонным каналом в 5,1 раза, а объём для прямоугольного волновода – в 6,4 раза.

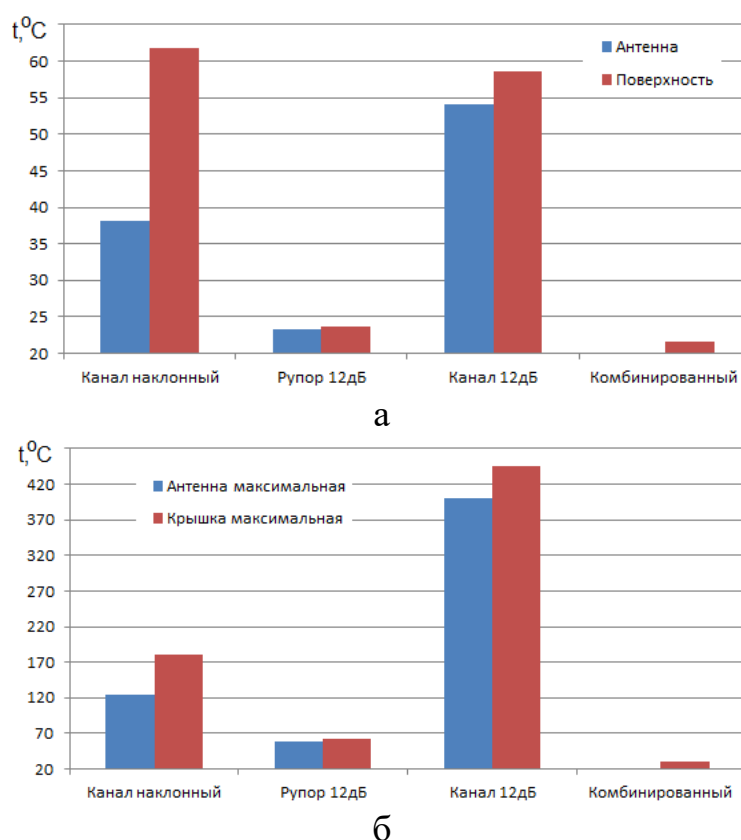


Рисунок 4 - Среднеобъёмные и максимальные по объёму слоя почвы температуры

Для дальнейшего исследования и разработки принят СВЧ-излучатель с волноводом с наклонным каналом (наклонным волноводом).

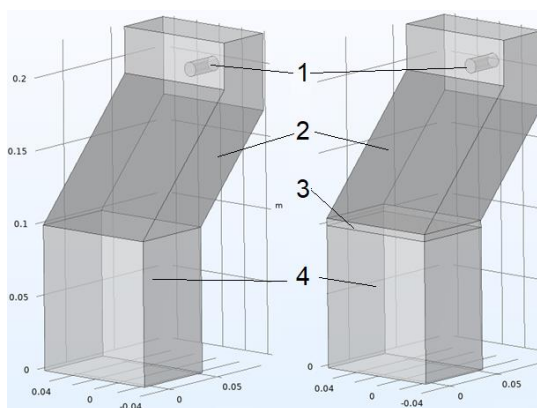
Рассмотрено тепловое действие СВЧ-излучения при изменении 2-х эксплуатационных факторов: наличия воздушного зазора между срезом волновода и поверхностью слоя почвы и влажности почвы, существенно изменяющей теплофизические и электромагнитные свойства почвы.

Для моделирования использованы расчётные схемы СВЧ-излучателей, срез которых расположен непосредственно на поверхности почвы и на расстоянии 5, 10 и 20 мм. В таблице 1 приведены свойства почвы, принятые к моделированию.

Таблица 1 – Таблица свойств почвы, принятых к моделированию

№	Свойства почвы					
	Влажность, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Относительная диэлектрическая проницаемость	Электрическая проводимость, См/м
1	сухая (5)	1100	1150	0,8	3	0,005
2	средняя (10)	1200	1250	0,85	15	0,1
3	влажная (20)	1300	1350	0,9	30	0,5

На рисунке 5 приведены изображения расчётных схем СВЧ-излучателя, расположенного непосредственно над поверхностью почвы (а), и СВЧ-излучателя, срез которого находится на расстоянии 5 мм от поверхности почвы (б).



1 – антенна магнетрона; 2 – волновод; 3 – слой воздуха; 4 – слой почвы

Рисунок 5 - Расчётные схемы СВЧ-излучателя

Контурные картины температурных полей в сечениях слоя почвы демонстрируют увеличение равномерности распределения температуры в слое почвы при увеличении высоты слоя воздуха между срезом излучателя и поверхностью почвы.

На рисунке 6 приведены графики изменения средних и максимальных значений температуры горизонтальных сечений слоя почвы на поверхности и глубине 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм.

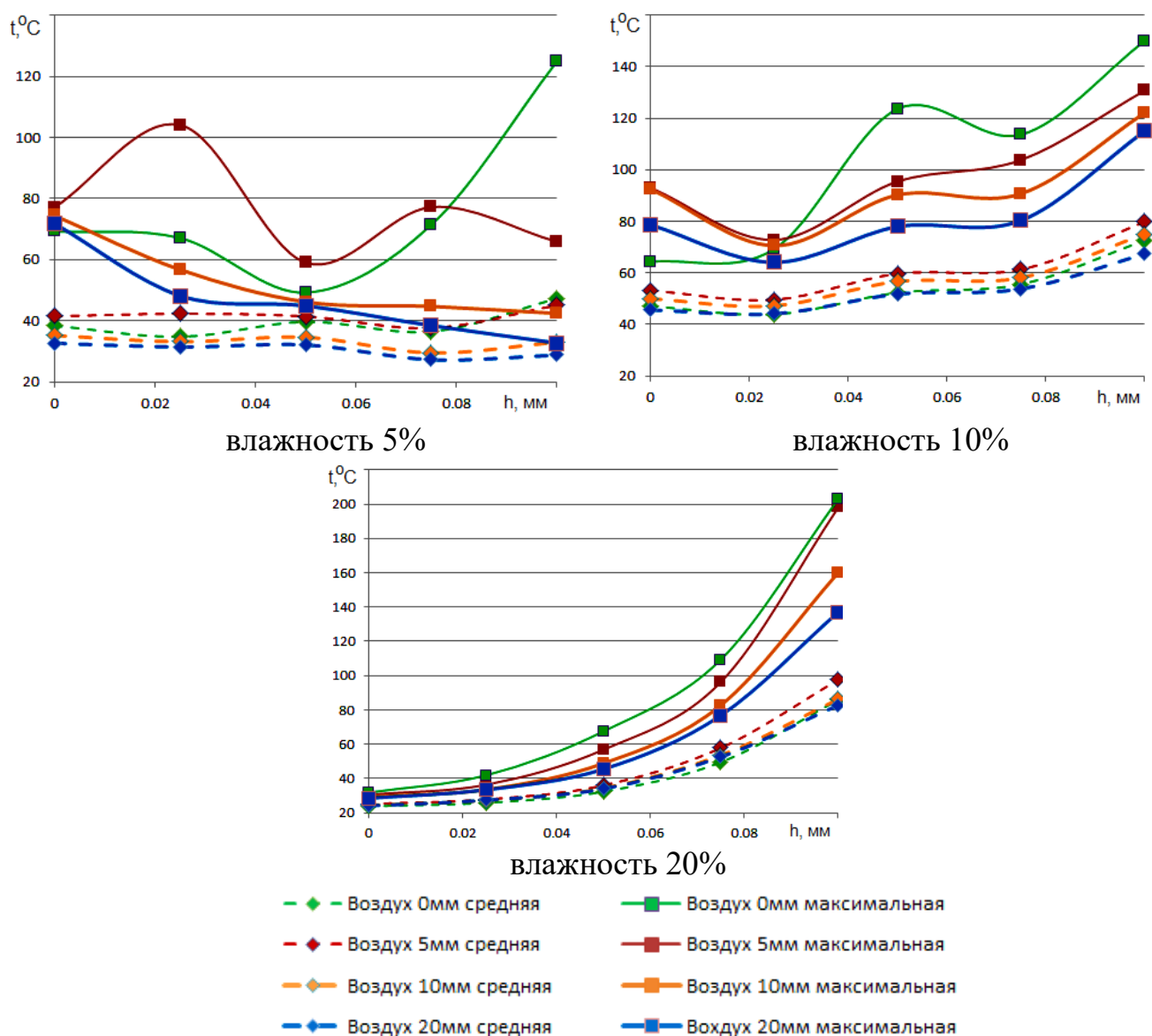
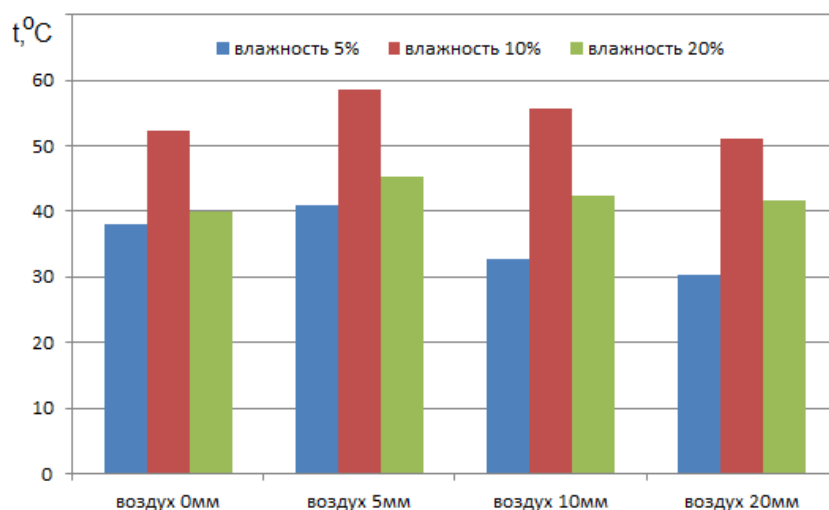


Рисунок 6 - Изменения средних и максимальных значений температуры горизонтальных сечений слоя почвы

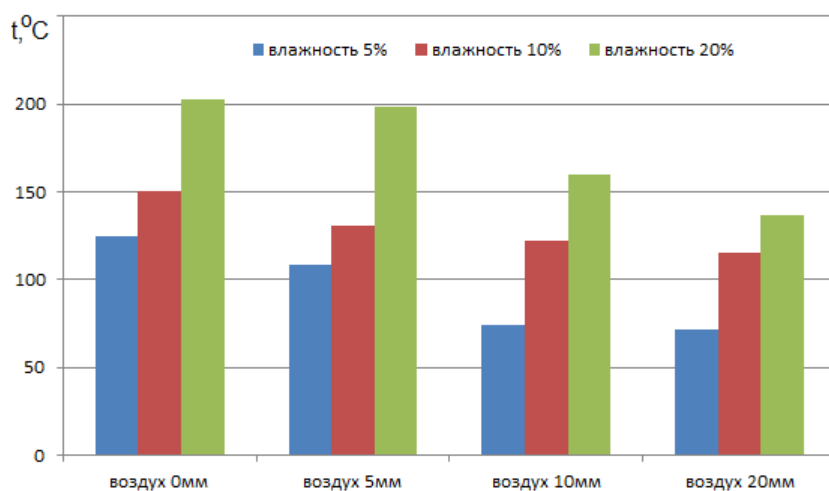
Из графиков рисунка 6 следует, что увеличение влажности слоя почвы приводит к увеличению неравномерности нагрева слоя по глубине, в большей степени нагреву подвергается слой почвы у поверхности.

На рисунке 7 представлены среднеобъёмные (а) и максимальные (б) по объёму слоя почвы температуры. Влияние свойств почвы и высоты воздушной прослойки между срезом излучателя и поверхностью почвы незначительны. Повышение влажности приводит к росту неравномерности прогрева слоя почвы. При изменении высоты воздушного слоя от 5 мм до 20 мм среднеобъёмная температура слоя

почвы снижается до уровня, соответствующего отсутствию воздушной прослойки. Рекомендуемым диапазоном высоты воздушного зазора между срезом излучателя и поверхностью почвы является диапазон от 0 мм до 20 мм.



а



б

Рисунок 7 - Среднеобъёмные (а) и максимальные (б) по объёму слоя почвы температуры

Лучшие показатели нагрева слоя почвы (максимальная среднеобъёмная температура и малое изменение максимальной по объёму температуры) для всего диапазона исследуемых свойств почвы и высоты слоя воздуха между срезом излучателя и поверхностью почвы соответствуют почве влажностью 10 %.

**Выводы.** СВЧ-излучатель с наклонным волноводом обеспечивает наибольший нагрев в срединной зоне слоя почвы и создаёт наиболее равномерное поле температуры в объёме слоя почвы.

Влияние свойств почвы и высоты воздушной прослойки между срезом излучателя и поверхностью почвы незначительны.

Рекомендуемым диапазоном высоты воздушного зазора между срезом излучателя и поверхностью почвы является диапазон от 0 мм до 20 мм.

Лучшие показатели нагрева слоя почвы (максимальная среднеобъёмная температура и малое изменение максимальной по объёму температуры) для всего диапазона исследуемых свойств почвы и высоты слоя воздуха между срезом излучателя и поверхностью почвы соответствуют почве влажностью 10 %.

СВЧ-излучатель с наклонным волноводом, мощностью источника излучения 1000 Вт, частотой излучения 2450 МГц при экспозиции 60 с обеспечивает нагрев слоя почвы глубиной 100 мм и поверхностью 60x88 мм до среднеобъёмной температуры от 45 °С до 60 °С при максимальной температуре в объёме почвы от 110 °С до 200 °С.

### Список литературы

1. Кабалоев, Т. Х. Энергетические режимы и технические средства обеззараживания почвы в защищенном грунте: специальности: 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве», 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кабалоев Таймураз Хамбиевич. – Зерноград, 2005. – 38 с.
2. Применение ИК-излучения для нагрева почвы в качестве обеззараживания в защищенном грунте / И. Г. Пospelова, Т. А. Широкова, И. В. Возмищев, И. В. Титов // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития : материалы юбилейной Международной конференции. – Могилев, 2021. – С. 154–155.
3. Хамуков, Ю. Х. Земледелие и вспашка. Вспашка как антропогенный фактор деградации экосистем / Ю. Х. Хамуков, М. А. Канокова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. –2022. – № 6 (110). – С. 225–235. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zemledelie-i-vspashka-vspashka-kak-antropogennyy-faktor-degradatsii-ekosistem/viewer> (дата обращения: 21.11.2024). – Текст: электронный.

4. Методы физического обеззараживания почвы. – URL: <https://rukav22.ru/c/metody-obezzarajivaniya-pochvy> (дата обращения: 22.11.2024). – Текст: электронный.
5. Применение радиационных агробиотехнологий при хранении и переработке растительного сырья / В. Н. Алёшин, А. Д. Ачмиз, Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Е. П. Викторова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2018. – № 136. – С. 22–35. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_32475978\\_23806741.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_32475978_23806741.pdf) (дата обращения: 07.11.2024). – Текст: электронный.
6. Баранов, Л. А. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта / Л. А. Баранов, М. Г. Бурнаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2007. – № 20(92). – С. 46–49. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_12922936\\_53631875.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_12922936_53631875.pdf) (дата обращения: 19.11.2024). – Текст: электронный.
7. Никишина, О. В. Комбинированные методы обработки почв / О. В. Никишина, Г. А. Морозов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 51–55. – EDN LNRICH.
8. Бородин, И. Ф. Применение сверхвысокой частоты в сельском хозяйстве / И. Ф. Бородин // Электричество. – 1989. – №6. – С. 1–8.
9. Патент № 2017145738 Российская Федерация, МПК A01B 47/00 (2006.01). Способ СВЧ-обработки почвы и устройство для его осуществления: № 2017145738: заявл. 25.12.2017; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 18 / А. А. Гаврилова, В. Г. Егорашин, А. Б. Иванов, М. А. Кревский, Д. А. Филатов, С.С. Тарасов. – 1 с.
10. Комарова, А. С. Влияние микроволнового излучения на почвенные бактерии: специальности: 03.00.07, 03.00.27: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Комарова Анастасия Сергеевна. – Москва, 2008. – 24 с.
11. Захаров, В. В. Математическое моделирование взаимосвязанных процессов электродинамики и тепломассопереноса в СВЧ установках с камерами бегущей волны и лучевого типа при термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств: специальность: 05.09.10 «Электротехнология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захаров Вадим Валерьевич. – Саратов, 2020. – 150 с.
12. Тригорлый С. В., Алексеев В. С., Захаров В. В., Калганова С. Г. Численное моделирование процесса сушки плоского диэлектрика в СВЧ-камере лучевого типа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. №2 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-protsessa-sushki-ploskogo-dielektrika-v-svch-kamere-luchevogo-tipa> (дата обращения: 08.06.2025).
13. Курушин А. А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL– М., «One-Book», 2016, 376 стр.
14. Анкудинов В. Е., Афлятунова Д. Д., Кривилев М. Д., Гордеев Г. А. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах: Учебное пособие. 1-е издание. — Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2014. — 108 с.
15. Проектирование антенных устройств систем связи / И. П. Заикин, А. В. Тоцкий, С. К. Абрамов. – Учебное пособие. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2007. – 78 с.

## References

1. Kabaloev, T. H. Jenergeticheskie rezhimy i tehicheskie sredstva obezzarazhivaniya pochvy v zashhishhenom grunte: special'nosti: 05.20.02 «Jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie v sel'skom hozjajstve», 05.20.01 «Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehicheskikh nauk / Kabaloev Tajmuraz Hambievich. – Zernograd, 2005. – 38 s.
2. Primenenie IK-izlucheniya dlja nagreva pochvy v kachestve obezzarazhivaniya v zashhishhenom grunte / I. G. Pospelova, T. A. Shirobokova, I. V. Voymishhev, I. V. Titov // Obrazovanie, nauka i proizvodstvo v XXI veke: sovremennye tendencii razvitiya : materialy jubilejnoj Mezhdunarodnoj konferencii. – Mogilev, 2021. – S. 154–155.
3. Hamukov, Ju. H. Zemledelie i vspashka. Vspashka kak antropogennyy faktor degradacii jekosistem / Ju. H. Hamukov, M. A. Kanokova // Izvestija Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN. – 2022. – № 6 (110). – S. 225–235. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-225-235. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zemledelie-i-vspashka-vspashka-kak-antropogennyy-faktor-degradatsii-ekosistem/viewer> (data obrashhenija: 21.11.2024). – Tekst: jelektronnyj.
4. Metody fizicheskogo obezzarazhivaniya pochvy. – URL: <https://rukav22.ru/c/metody-obezzarazhivaniya-pochvy> (data obrashhenija: 22.11.2024). – Tekst: jelektronnyj.
5. Primenenie radiacionnyh agrobiotehnologij pri hranenii i pererabotke rastitel'nogo syr'ja / V. N. Aljoshin, A. D. Achmiz, T. V. Pershakova, G. A. Kupin, E. P. Viktorova // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – № 136. – S. 22–35. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_32475978\\_23806741.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_32475978_23806741.pdf) (data obrashhenija: 07.11.2024). – Tekst: jelektronnyj.
6. Baranov, L. A. Ustrojstvo dlja jelektermicheskoy obrabotki pochvy zashhishhenogo grunta / L. A. Baranov, M. G. Burnaev // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika. – 2007. – № 20(92). – S. 46–49. – URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_12922936\\_53631875.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_12922936_53631875.pdf) (data obrashhenija: 19.11.2024). – Tekst: jelektronnyj.
7. Nikishina, O. V. Kombinirovannye metody obrabotki pochv / O. V. Nikishina, G. A. Morozov // Jelektronika, fotonika i kiberfizicheskie sistemy. – 2022. – T. 2, № 2. – S. 51–55. – EDN LNRICH.
8. Borodin, I. F. Primenenie sverhvysokej chastoty v sel'skom hozjajstve / I. F. Borodin // Jelektrichestvo. – 1989. – №6. – S. 1–8.
9. Patent № 2017145738 Rossijskaja Federacija, MPK A01V 47/00 (2006.01). Sposob SVCh-obrabotki pochvy i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija: № 2017145738: zajavl. 25.12.2017: opubl. 25.06.2019, Bjul. № 18 / A. A. Gavrilova, V. G. Egorashin, A. B. Ivanov, M. A. Krevskij, D. A. Filatov, S.S. Tarasov. – 1 s.
10. Komarova, A. S. Vlijanie mikrovolnovogo izlucheniya na pochvennye bakterii: special'nosti: 03.00.07, 03.00.27: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata biologicheskikh nauk / Komarova Anastasija Sergeevna. – Moskva, 2008. – 24 s.
11. Zaharov, V. V. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvjazannyh processov jelektrodinamiki i teplomassoperenosa v SVCh ustanovkah s kamerami begushhej volny i lucheвого tipa pri termoobrabotke dijelektrikov s uchetom izmeneniya ih fizicheskikh svojstv: special'nost': 05.09.10 «Jelektrotehnologija» : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehicheskikh nauk / Zaharov Vadim Valer'evich. – Saratov, 2020. – 150 s.
12. Trigorlyj S. V., Alekseev V. S., Zaharov V. V., Kalganova S. G. Chislennoe modelirovanie processa sushki ploskogo dijelektrika v SVCh-kamere lucheвого tipa // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehicheskogo universiteta. Serija: Tehicheskie

nauki. 2018. №2 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-protsessa-sushki-ploskogo-dielektrika-v-svch-kamere-luchevogo-tipa> (data obrashhenija: 08.06.2025).

13. Kurushin A. A. Reshenie mul'tifizicheskikh SVCh zadach s pomoshh'ju SAPR COMSOL— M., «One-Book», 2016, 376 str.

14. Ankudinov V. E., Afljatunova D. D., Krivilev M. D., Gordeev G. A. Komp'juternoe modelirovanie processov perenosa i deformacij v sploshnyh sredah: Uchebnoe posobie. 1-e izdanie. — Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet», 2014. — 108 c.

15. Proektirovanie antennyh ustrojstv sistem svjazi / I. P. Zaikin, A. V. Tockij, S. K. Abramov. — Uchebnoe posobie. — Har'kov: Nacional'nyj ajerokosmicheskij universitet «Har'kovskij aviacionnyj institut», 2007. — 78 s.