

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08:632.935.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

Анализ тепловой эффективности обеззараживающего электродного нагрева почвы

А.А. Завалий¹, Н.В. Алдошин², С.С. Воложанинов³, Д.Д. Волобуев⁴^{1,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; г. Симферополь, Россия² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³ s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>⁴ volobyev99@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>

Аннотация. Обеззараживающая обработка почвы в теплицах позволяет очистить ее от патогенной микрофлоры и летучих органических веществ и улучшить качество производимой растительной продукции. Электродный нагрев почвы и эффективность различных его схем пока не изучены. Цель исследований – определение показателей тепловой эффективности электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы. С помощью вычислительных моделей COMSOL Multiphysics выполнено моделирование электродного нагрева образцов почвы в среднем от 20,7 до 87,1°C влажностью 5 и 20% с использованием электродов различной формы (стержневых цилиндрических, плоских пластинчатых и дисковых). Электрический потенциал электродов составлял +150...-150 В. Время нагрева – 60 с. Размеры расчетной области: длина – 800 мм, ширина – 400 мм, глубина – 300 мм; размеры нагреваемого образца почвы – 200 x 200x60 мм. Глубина погружения электродов в почву составляла 100 мм. Проведено расчетное моделирование нагрева образца почвы пластинчатыми электродами при наличии электроизоляции, изменении количества электродов (2, 3, 8, 14) и их взаимного расположения. Установили зависимость необходимой для нагрева разности потенциалов на электродах от свойств почвы, геометрии электродов и их размещения в обрабатываемом слое почвы. Выявили, что дисковые электроды обеспечивают наилучшую равномерность температурного поля в нагреваемом образце за счет цилиндрического расположения линий электрического потенциала между электродами. Повышение эффективности устройств прямого обеззараживающего нагрева слоя почвы достигается уменьшением расстояния между электродами, увеличением их количества, использованием электроизолирующих материалов. Равномерный нагрев объема почвы и высокая энергетическая эффективность нагрева 96,32% достигаются при полной изоляции поверхности электродов и образца почвы. Разработанные расчетные модели позволяют проектировать энергоэффективные устройства, обеспечивающие прямой электрический равномерный нагрев обрабатываемого слоя почвы.

Ключевые слова: почва; обеззараживающая обработка почвы; электродный нагрев почвы; электрод; электрический потенциал; эффективность нагрева; устройства прямого электрического нагрева

Для цитирования: Завалий А.А., Алдошин Н.В., Воложанинов С.С., Волобуев Д.Д. Анализ тепловой эффективности обеззараживающего электродного нагрева почвы // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 17-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of thermal efficiency of disinfection electrode heating of the soil

A.A. Zavalii¹, N.V. Aldoshin², S.S. Volozhaninov³, D.D. Volobuev⁴^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russia² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>² naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>³ s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>⁴ volobyev99@mail.ru

Abstract. Disinfection treatment of greenhouse soil helps eliminate pathogenic microflora and volatile organic compounds, thereby improving the quality of plant products. However, electrode-based soil heating and

the effectiveness of its various configurations have not yet been sufficiently investigated. The study aims to determine the thermal efficiency indicators of electrode-based disinfection heating of a soil layer. Using computational models in COMSOL Multiphysics, the authors simulated electrode heating of soil samples with moisture contents of 5% and 20%, raising the average temperature from 20.7°C to 87.1°C. Electrodes of various geometries were employed: cylindrical rod electrodes, flat plate electrodes, and disc electrodes. The electric potential applied to the electrodes was ± 150 V, with a heating duration of 60 seconds. The computational domain measured 800 mm in length, 400 mm in width, and 300 mm in depth; the heated soil sample itself had dimensions of $200 \times 200 \times 60$ mm. Electrodes were immersed to a depth of 100 mm. Computational modeling was also performed for heating a soil sample with plate electrodes under electrical insulation conditions, varying the number of electrodes (2, 3, 8, 14) and their mutual arrangement. The study established relationships between the required potential difference for heating and the soil properties, electrode geometry, and electrode placement within the treated layer. The results indicate that disc electrodes provide the best temperature field uniformity in the heated sample due to the cylindrical configuration of electric potential lines between the electrodes. Improving the efficiency of direct disinfection heating devices can be achieved by reducing the distance between electrodes, increasing their number, and employing electrically insulating materials. Uniform heating of the soil volume and a high energy efficiency of 96.32% are attained when both the electrodes and the soil sample surfaces are fully insulated. The developed computational models enable the design of energy-efficient units that ensure direct, uniform electrical heating of the treated soil layer.

Keywords: soil; soil disinfection treatment; electrode heating of the soil; electrode; electric potential; heating efficiency; direct electric heating devices

For citation: Zavaliy A.A., Aldoshin N.V., Volozhaninov S.S., Volobuev D.D. Analysis of thermal efficiency of disinfection electrode heating of the soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):17-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-17-26>

Введение

Патогенная бактериальная и грибковая микрофлора почвы негативно влияет на качество сельскохозяйственной продукции [1-3]. Обеззараживающая обработка почвы осуществляется химическими и физическими методами [1]. При химической обработке, помимо загрязнения почвы и грунтовых вод пестицидами, происходит опосредованное загрязнение, обусловленное хранением, переработкой и утилизацией неиспользованных пестицидов на агропромышленных предприятиях^{1,2} [4]. Избежать отрицательного действия на окружающую среду позволяют физические методы. Одним из них является нагрев почвенного слоя различными теплоносителями (вода, водяной пар, продукты сгорания углеводородного топлива)³ [1, 5], который сопровождается существен-

ными тепловыми потерями в окружающую среду [6]. Другой перспективный метод – прямой нагрев электрическим током (электродный нагрев почвы) или электромагнитным излучением с характерной высокой тепловой отдачей без потерь в окружающую среду, высокой скоростью и равномерностью нагрева слоя почвы [6-8]. К тому же электродный нагрев почвы приводит к ее обеззараживанию от патогенной микрофлоры [9, 10] и очистке от летучих органических веществ. Снижение химического воздействия позволяет сократить содержание пестицидов в почве и грунтовых водах, тем самым улучшить качество производимой растительной продукции [11, 12].

В практике применения электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы сталкиваются с необходимостью снижения переходного сопротивления от проводника электрического тока к слою почвы и утечек электрического потенциала в окружающий обрабатываемый слой. Существует зависимость тепловыделения в почве от ее влажности и состава [7]. В устройствах электродного нагрева применяют электроды различной формы: цилиндрические стержни; плоские пластины или скользящие в прорезаемой борозде полозья; дисковые электроды, катящиеся по прорезаемой борозде^{4,8}. К трехфазной сети элект-

¹ Состояние загрязнения пестицидами объектов природной среды Российской Федерации в 2022 году: Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун»», 2023. 88 с.

² Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год / Под ред. Г.М. Черногаевой. М.: Росгидромет, 2023. 215 с.

³ Пospelova И.Г., Возмищев И.В. Способы обеззараживания почвы и субстрата в условиях защищенного грунта // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения П.А. Столыпина (г. Ульяновск, 14-15 апреля 2022 г.). Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2022. С. 453-457. EDN: ROIQEE.

⁴ Передвижное устройство для стерилизации почвы и стимулирования роста полезных растений: А.с. 75810 СССР, МПК А 01М 17/00. (СССР). № 359088 / Б.Б. Кажинский; заявл. 08.09.49; опубл. 30.06.49. 2 с. EDN: YTXVVN.

роды подключают по схемам «Звезда» или «Треугольник»; используют также «нулевые» электроды с целью уменьшения потерь от токов утечек при обработке почвы [7]. Экспериментальная оценка потерь энергии при обеззараживающей обработке почвы и сведения о температурной неравномерности (необходимости охлаждать электроды во время обработки) представлены в исследовании [7]. Однако в источниках литературы не удалось обнаружить сведения о количественном анализе энергетической эффективности применения различных схем электродного нагрева и об оценке равномерности нагрева при использовании этих схем.

Цель исследований: определение показателей тепловой эффективности электродного обеззараживающего нагрева слоя почвы.

В качестве показателей рассмотрим отношение количества тепловой энергии, накопленной в слое почвы при ее нагреве, к количеству энергии, затраченной на процесс нагрева, и степень равномерности нагрева обрабатываемого слоя почвы.

Материалы и методы

Инструментом расчетного исследования является интегрированная программная среда COMSOL

Multiphysics, основанная на методе конечных элементов⁵. Для решения задачи электротеплового взаимодействия электродов и массива почвы использованы модули решателей AC/DC → Electric Fields and Currents → Electric Currents и Heat Transfer → Heat Transfer in Solids, переменными величинами в которых являются (Electric potential (V)) и температура (Temperature (T)). Задача решается в нестационарной, зависящей от времени постановке (General Studies → Time dependent). Общая схема электротеплового взаимодействия электродов и массива почвы представлена на рисунке 1.

Расчетная область, включающая в себя боковые 3 и центральный 4 массивы почвы (рис. 1), имеет следующие размеры: длину 800 мм, ширину 400 мм, глубину 300 мм. Нагреваемый образец почвы 2 составляет 200×100×60 мм соответственно. Глубина погружения электродов в почву – 100 мм. Области центрального 4 и боковых массивов почвы 3 разделены с целью возможности задания для них различной влажности (5 и 20%) и, соответственно, тепловых и электрических свойств. Постоянные свойства почвы, принятые к моделированию теплового и электрического взаимодействия электродов с почвой^{6,7,8} приведены в таблице 1.

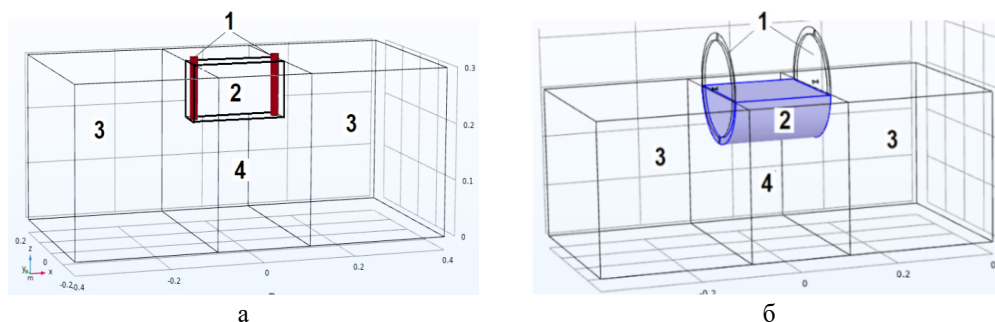


Рис. 1. Схема электротеплового воздействия на массив почвы электродов в виде стержней и пластин (а) и дисков (б): 1 – электроды; 2 – нагреваемый образец почвы; 3 – боковой массив почвы; 4 – центральный массив почвы

Fig. 1. Pattern of electrothermal interaction of electrodes and soil mass:

a – rod and plate electrodes; b – disc electrodes; 1 – electrodes; 2 – heated soil sample; 3 – lateral soil array; 4 – central soil array

Свойства почвы, принятые к моделированию

Таблица 1

Table 1

Soil properties taken for modeling

Влажность почвы, %	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Относительная диэлектрическая проницаемость	Электрическая проводимость, См/м
5	1100	1150	0,8	3	0,005
20	1300	1350	0,9	30	0,5

⁵ Курушин А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL. М.: One-Book, 2016. 376 с.

⁶ Электрическая проводимость почвы. URL: https://studfile.net/html/1334/288/html_SzT016FBAL.l0og/img-ummcB6.png (дата обращения: 09.10.2025);

⁷ Относительная диэлектрическая проницаемость. URL: <https://konspekta.net/studopedianet/baza7/572746186364.files/image085.png> (дата обращения: 09.10.2025).

⁸ Магнитная проницаемость. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_проницаемость (дата обращения: 09.10.2025).

Боковые и нижняя границы расчетной области имеют нулевой электрический потенциал, верхняя граница электроизолирована. На рисунке 2 представлены линии тока электрического потенциала в расчетной области при приложении к электродам положительного и отрицательного потенциалов, демонстрирующие направление утечек энергии электрического поля.

Нагреваемый образец почвы представляет собой цилиндрический сегмент (рис. 1) высотой 200 мм, длиной хорды 219 мм, радиусом 110 мм.

Схемы взаимодействия стержневых цилиндрических, плоских пластинчатых и дисковых электродов, погруженных в массивы почвы различной влажности на глубину 100 мм, представлены в таблице 2. Условия решения задачи электротеплового взаимодействия электродов и почвы для всех схем: потенциалы электродов составляют +150 В и -150 В; время нагрева – 60 с.

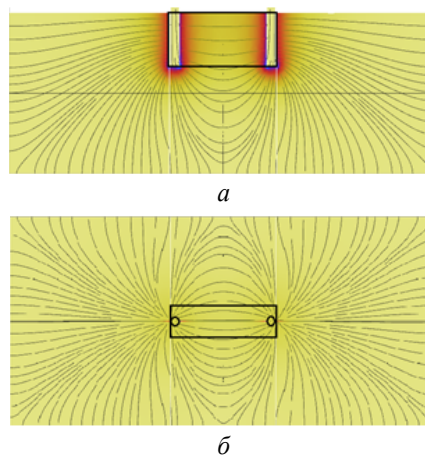


Рис. 2. Линии тока электрического потенциала в расчетной области:
 а – вид спереди; б – вид сверху
Fig. 2. Electric potential current lines in the computational domain:
 a – front view; b – top view

Схема эксперимента воздействия различных электродов на массивы почвы различной влажности

Таблица 2

Experimental design to determine the effect of various electrodes on soil samples of varying moisture content

Table 2

Вариант	Влажность почвы, %	Массив почвы (рис. 1)	Вид электродов		
1	5	2,3,4	1. Стержневые электроды диаметром 16 мм (площадь сечения – 201 мм ²)	2. Пластинчатые электроды сечением 5×40 мм (площадь сечения – 200 мм ²)	3. Дисковые электроды диаметром 220 мм толщиной 5 мм. Диаметр подводящего токопровода – 8 мм (площадь сечения – 50,3 мм ²)
2	20	2,3,4			
3	20	2 и 4			
	5	3			
4	20	2			
	5	3,4			

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета эффективности нагрева, определяемой как отношение мощности нагрева образца почвы к затрачиваемой электрической мощности, приведены в таблице 3.

На рисунке 3 приведены изотермы (вид спереди и вид сверху) образца почвы в диапазоне от 35 до 140°C.

Из данных рисунка 3 следует, что наибольшая равномерность нагрева образца почвы для всех рассматриваемых схем наблюдается в варианте 4. Изменение температуры в сечениях, проходящих через оси электродов, по линиям на глубине 0,01; 0,03; 0,05 и 0,09 м для варианта 4 приведено на рисунке 4.

Использование при выполнении расчетного моделирования постоянных по величине свойств почвы и плотного электрического контакта почвы и электродов позволило получить наилучшие оценки

энергетической эффективности и равномерности нагрева образца почвы.

Проведено расчетное моделирование нагрева образца почвы пластинчатыми электродами при наличии электроизоляции боковых поверхностей электродов и образца почвы (рис. 5а), электроизоляции боковых поверхностей и донной поверхности образца почвы (рис. 5б) и электроизоляции боковых, лицевых и донных поверхностей образца почвы (рис. 5в). Физические свойства электроизолирующего слоя соответствуют свойствам воздуха.

На рисунке 6 приведены изотермы (вид спереди и вид сверху) образца почвы в диапазоне 35...140°C, а в таблице 4 представлены результаты расчета энергетической эффективности нагрева с использованием электроизоляции. На рисунке 7 для варианта б приведен график изменения температуры в сечениях, проходящих через оси электродов, по линиям на глубине 0,21; 0,23; 0,25 и 0,29 м.

Таблица 3

Эффективность нагрева образца почвы

Table 3

Efficiency of heating the soil sample

Вариант, №	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффективность нагрева, %	Средняя температура образца, °С
Схема 1. Электроды-стержни						
1	0,207	62,1	22,72	59,86	36,60	20,9
2	20,7	6207	2354	5737	37,93	87,1
3	14,02	4205	2050	3435	48,74	78,4
4	5,24	1570	1366	1543	86,97	58,9
Схема 2. Электроды-пластины						
1	0,246	73,6	16,82	68,79	22,80	20,7
2	24,55	7365	1724	6962	23,41	69,2
3	14,10	4233	1846	3505	43,61	72,6
4	4,94	1483	1285	1469	86,71	56,6
Схема 3. Электроды-диски						
1	0,49	148,2	38,7	126,96	26,11	25,66
2	49,3	14799	4310	14141	29,18	66,00
3	28,7	8613	4230	7740	49,06	65,08
4	13,8	4132	3670	3980	88,90	

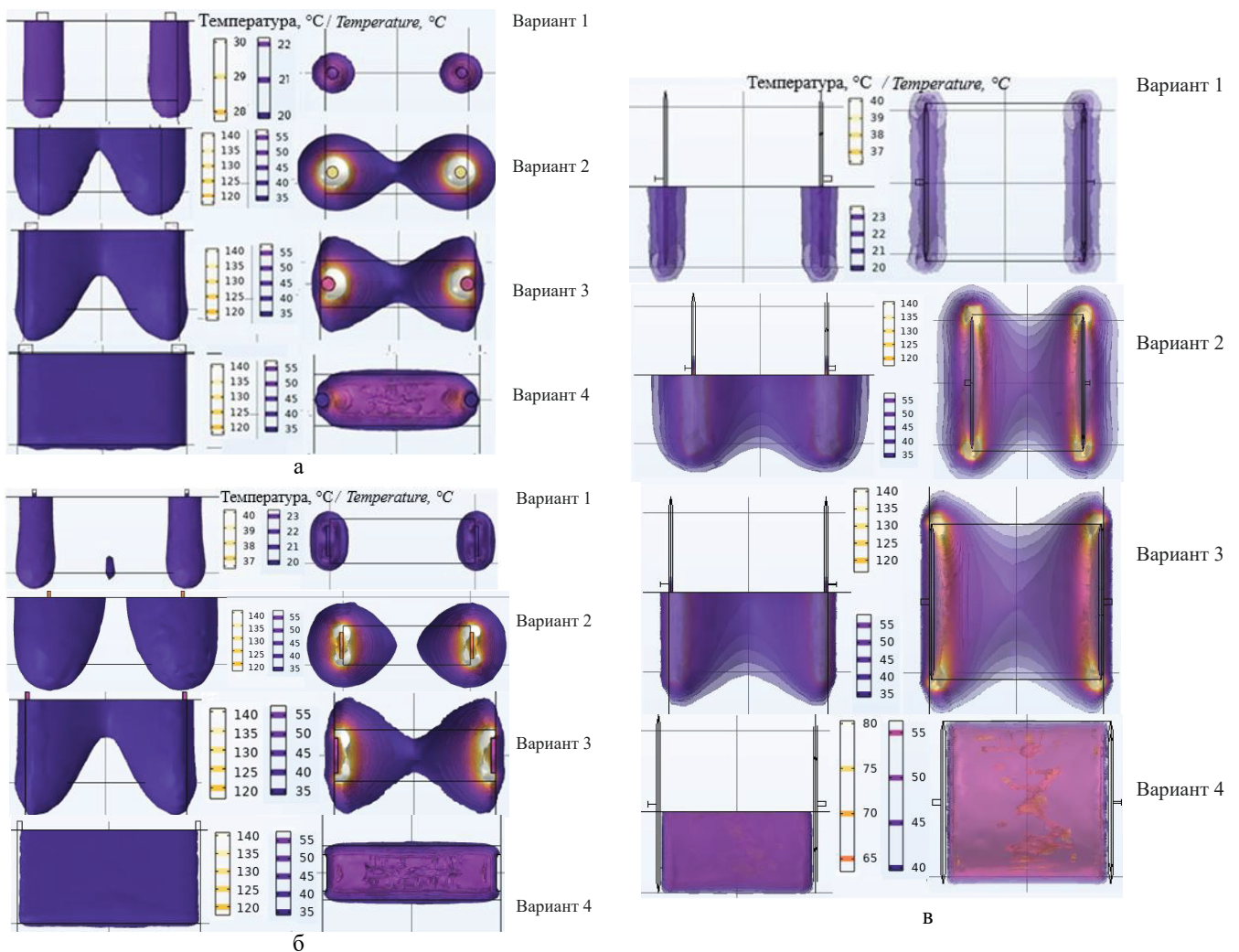


Рис. 3. Распределение температуры в образце почвы: а – электроды-стержни; б – электроды-пластины; в-электроды-диски

Fig. 3. Temperature distribution in the soil sample: а – Rod electrodes; б – Plate electrodes; в – Disc electrodes

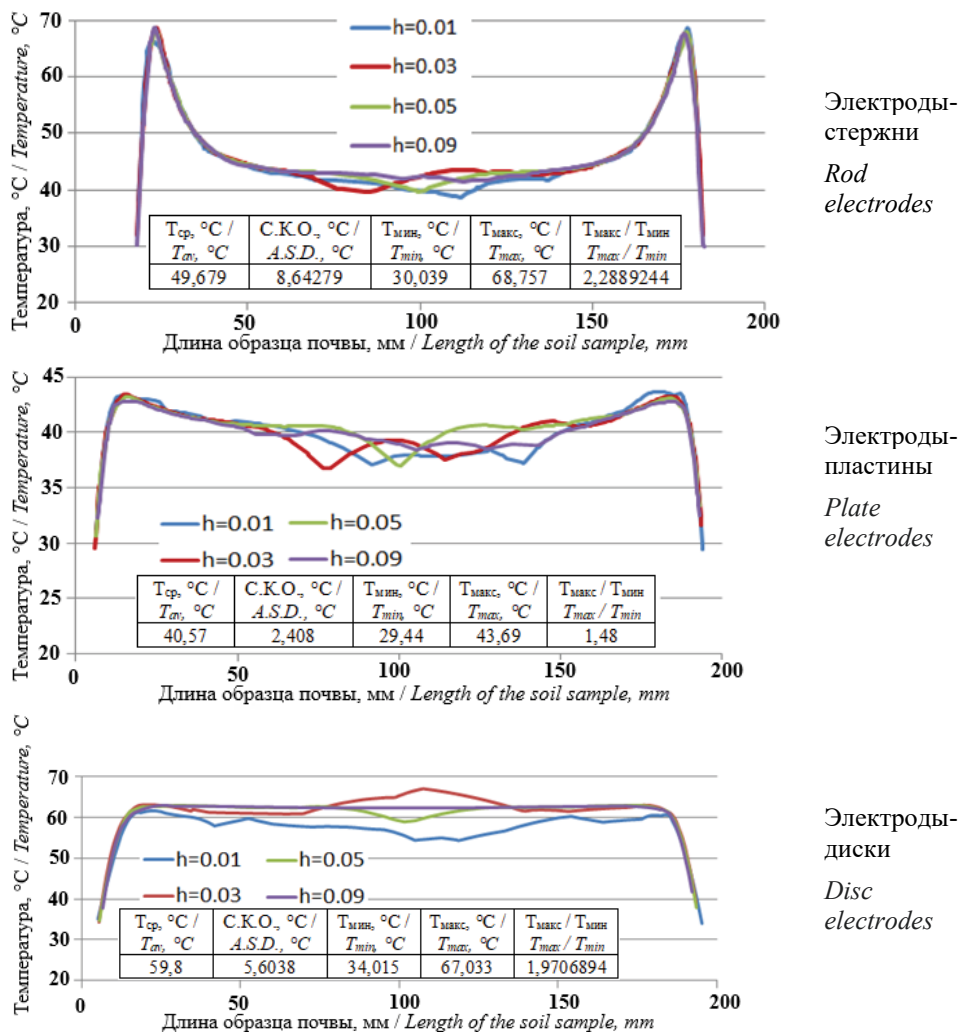


Рис. 4. Распределение температуры в осевом сечении образца почвы
Fig. 4. Temperature distribution in the axial section of the soil sample

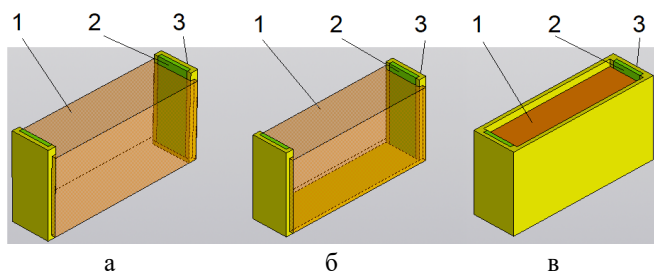


Рис. 5. Схемы нагрева с использованием электроизоляции боковых поверхностей электродов и образца почвы (а), боковых поверхностей и донной поверхности образца почвы (б), боковых, лицевых и донных поверхностей образца почвы (в):
1 – нагреваемый образец почвы; 2 – электроды; 3 – электроизоляция

Fig. 5. Heating patterns of the soil sample using electrical insulation:

a – electrical insulation of the side surfaces of the electrodes and the soil sample; b – electrical insulation of the side surfaces and the bottom surface of the soil sample; c – electrical insulation of the side, front and bottom surfaces of the soil sample; 1 – heated soil sample; 2 – electrodes; 3 – electrical insulation

Электроизоляция гарантирует отсутствие токов утечек через свою поверхность и повышение энергетической эффективности нагрева образца почвы.

Согласно данным рисунка 6 и таблицы 4 боковая изоляция позволяет повысить эффективность по сравнению со случаем влажного образца и центрального массива и сухих боковых массивов почвы с 43,61 до 51% (схема 2. Электроды-пластины, вариант 3 таблицы 3), но при этом создает поле температуры внутри образца, где центральная часть образца не подвергается нагреву (рис. ба). Изоляция боковых и донной поверхностей позволяет поднять величину эффективности до 88,6%, но тоже не обеспечивает нагрев центральной части образца почвы. Только полная изоляция всех поверхностей позволяет повысить энергетическую эффективность нагрева до 96,32% и равномерность нагрева по всему объему образца почвы, что является ожидаемым результатом для рассматриваемой задачи.

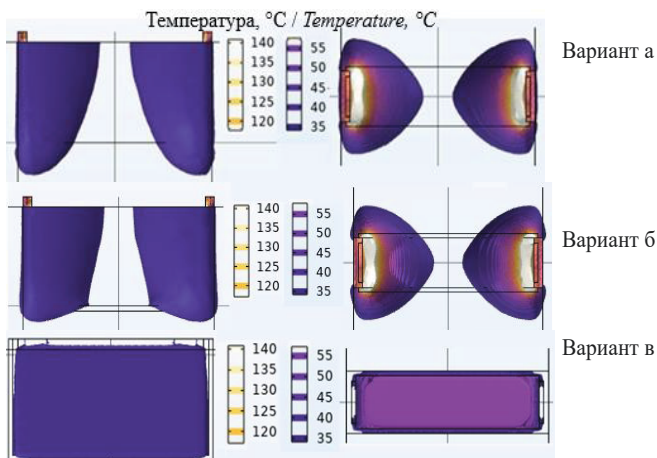


Рис. 6. Распределение температуры в образце почвы
Fig. 6. Temperature distribution in the soil sample

Техническими решениями, направленными на повышение энергетической эффективности и равномерности нагрева почвы, являются уменьшение расстояния между электродами (сокращение пространства рассеяния электрического потенциала в направлениях вперед/назад и вниз по отношению к расположению электродов) и увеличение количества электродов (уменьшение доли потерь электрического потенциала в боковые массивы почвы). Однако такие технические решения существенно усложняют конструкцию устройств

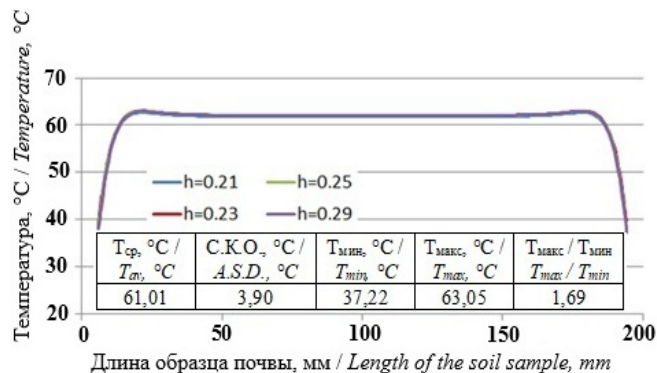


Рис. 7. Распределение температуры в осевом сечении образца почвы в случае изоляции боковых и донной поверхностей образца почвы
Fig. 7. Temperature distribution in the axial section of the soil sample with the insulated side and bottom surfaces of the soil sample

нагрева и управление энергоснабжением электродов устройства.

В таблице 5 приведены результаты расчета энергетической эффективности нагрева слоя почвы влажностью 20% пластинчатыми электродами: 1-й вариант – 2 электрода на расстоянии 100 мм; 2-й вариант – 3 электрода, расположенные в ряд на расстоянии 100 мм друг от друга; 3-й вариант – 8 расположенных в ряд электродов на расстоянии 100 мм друг от друга; 4-й вариант – 14 расположенных в ряд электродов

Эффективность нагрева образца почвы с использованием электроизоляции

Таблица 4

Efficiency of heating the soil sample when using electrical insulation

Table 4

Вариант, №	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффективность нагрева, %	Средняя температура образца, °C
а	12,8	3839	1958	3109	51,00	75,78
б	4,83	1450	1285	1449	88,60	56,61
в	3,92	1177	1134	1138	96,32	60,79

Таблица 5

Эффективность нагрева образца почвы

Table 5

Efficiency of heating the soil sample

Вариант, №	Разность потенциалов, В	Сила тока в электроде, А	Электрическая мощность, Вт	Мощность нагрева образца, Вт	Мощность нагрева массива, Вт	Эффектив-ность нагрева, %	Средняя температура образца, °C
1	180	17,2	3094	950	2895	30,71	74,14
2	180	16,7	6019	1954	4524	32,50	75,67
3	160	17,45	11168	5971	10376	53,51	70,53
4	160	17,74	19866	11067	18439	55,75	70,31

на расстоянии 100 мм друг от друга. Между соседними электродами установлена разность потенциалов, обеспечивающая среднюю температуру нагрева образца почвы в пределах 70...75°C в течение 60 с.

На рисунке 8 представлены линии тока электрического потенциала в расчетной области для

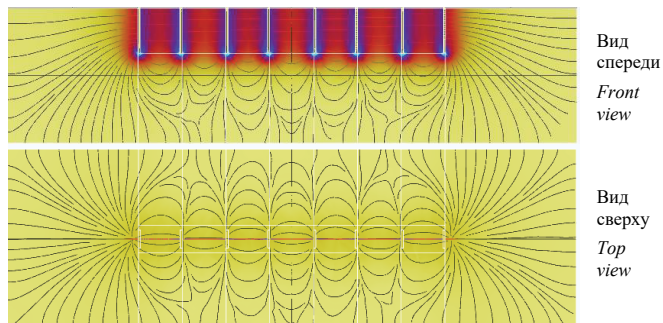


Рис. 8. Линии тока электрического потенциала в расчетной области

Fig. 8. Electric potential current lines in the computational domain

варианта 3 (8 электродов). На рисунке 9 представлены графики распределения температуры в сечении расчетной области, проходящем через оси электродов, по линиям на глубине 0,01; 0,03; 0,05 и 0,09 м после нагрева в течение 60 с, а также распределение электрического потенциала в массиве почвы между электродами в этом же сечении для варианта 3.

Сравнивая данные (схема 2. Электроды-пластины, вариант 2 таблицы 3) с данными таблицы 5, можно заключить, что уменьшение расстояния между электродами с 200 до 100 мм привело к повышению эффективности нагрева с 23,41 до 30,71%. Увеличение количества электродов до 8 позволило повысить эффективность до 53,51%; эффективность использования 14 электродов составила 55,75%. При этом в объеме нагреваемого слоя почвы наблюдается существенная неравномерность температуры (рис. 9), которая сохраняется и для варианта 4 (14 электродов).

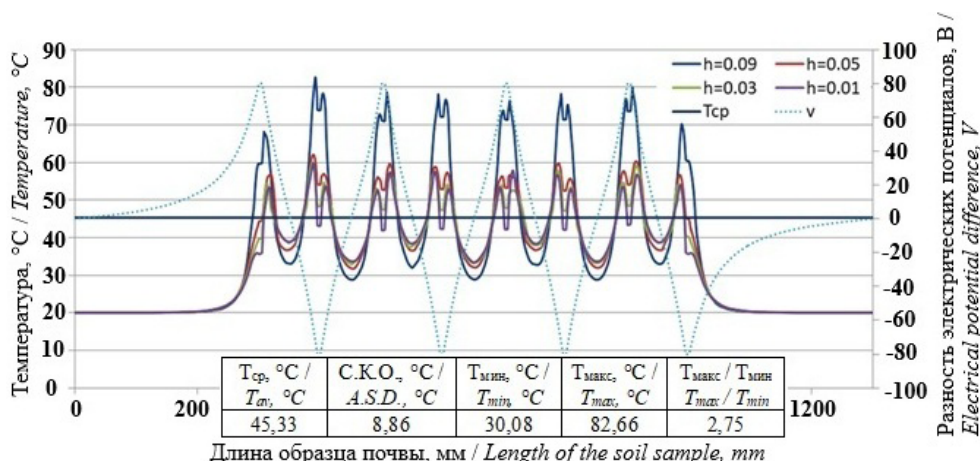


Рис. 9. Распределение температуры и разности электрических потенциалов в осевом сечении расчетной области почвы

Fig. 9. Distribution of temperature and electric potential difference in the axial section of the computational domain of the soil

Выводы

1. Утечки электрического потенциала через равномерно влажную почву, окружающую электроды и нагреваемый образец почвы, не позволяют в рассмотренных схемах нагрева получить эффективность нагрева более 40%.

2. Форма электродов несущественно влияет на энергетическую эффективность. Дисковые электроды обеспечивают наилучшую равномерность температурного поля в нагреваемом образце за счет цилиндрического расположения линий электрического потенциала между электродами.

3. Повышение энергетической эффективности нагрева достигается при увеличении электрического

сопротивления почвы, окружающей электроды, и нагреваемого образца почвы (нагреваемый образец почвы влажностью 20% окружен почвой влажностью 5%).

4. Энергетическая эффективность и равномерность нагрева почвы зависят от ее свойств и геометрии размещения электродов в ней. Необходимая для заданного уровня нагрева разность потенциалов на электродах существенно зависит от свойств почвы, геометрии электродов и их размещения в обрабатываемом слое почвы.

5. Повысить эффективность устройств прямого обеззараживающего нагрева слоя почвы можно уменьшением расстояния между электродами

устройства, увеличением количества электродов и использованием в устройствах электроизолирующих материалов.

6. Разработанные расчетные модели в программной среде COMSOL Multiphysics позволяют

проектировать энергоэффективные устройства прямого электрического нагрева почвы, обеспечивающие равномерный нагрев обрабатываемого слоя.

Список источников

1. Микаелян Г.А., Нурметов Р.Д. Способы и методы обеззараживания почвы в теплицах // В кн.: Основы оптимального проектирования производственных процессов в овощеводстве: Монография. М.: Росинформагротех, 2005. С. 443-448. EDN: QKXKUZ
2. Никитина О.В., Стифеев А.И., Трутаева Н.Н. Микроорганизмы почв и их влияние на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4. С. 63-69. EDN: TCQXMP
3. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л. и др. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14-25. EDN: GWOPRX
4. Смирнова П.С., Тихомирова В.В. Проблема загрязнения почвы пестицидами и пути ее решения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 3. С. 37-41. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13519>
5. Пospelova И.Г., Возмищев И.В., Ниязов А.М. К вопросу о способах обеззараживания почвы в защищенном грунте // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 3 (40). С. 45-49. EDN: NONPMR
6. Кабалоев Т.Х., Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152. EDN: YRLMVN
7. Баранов Л.А., Бурнаев М.Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2007. № 20. С. 46-49. EDN: KWUPRZ
8. 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>
9. Топорков В.Н., Королев В.А. Интенсификация электроимпульсных процессов в агротехнологиях // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 3 (39). С. 1-10. EDN: ZVHYKR
10. Jason D. Crisp, Ekaterini Riga, Gordon J. McComb. Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen: patent US12433285B2. Lisi Global Inc. US. 2025.10.07. Appl. No. US18/243,060 filed 2023.09.06. IPC: A01M19/00. URL: US12433285B2 – Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen – Google Patents (date of access: 23.11.2025)
11. Wolf J., Gomes T., Barton T., Damasi D. Electrical resistance heating: rapid treatment for soil and groundwater remediation. Águas Subterrâneas. July 2009. URL: (PDF) Electrical Resistance Heating: Rapid Treatment for Soil and Groundwater Remediation (date of access: 23.11.2025)
12. Никишина О.В., Морозов Г.А. Комбинированные методы обработки почв // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2, № 2. С. 51-55. EDN: LNRICH

References

1. Mikaelyan G.A., Nurmetov R.D. Methods and methods of soil disinfection in greenhouses. In: Fundamentals of optimal design of production processes in vegetable growing: Monograph. Moscow, Rosinformagrotekh. 2005:443-448. (In Russ.)
2. Nikitina O.V., Stifeev A.I., Trutaeva N.N. Soil microorganisms and their effect on crop yields. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2024;4:63-69. (In Russ.)
3. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L. et al. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;3:14-25. (In Russ.)
4. Smirnova P.S., Tikhomirova V.V. The problem of soil contamination with pesticides and ways to solve it. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2023;3:37-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/mjpf.13519>
5. Pospelova I.G., Vozdichchev I.V., Niyazov A.M. Soil disinfection methods in protected ground. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020;67(3):45-49. (In Russ.)
6. Kabaloev T.Kh., Gatuева K.K., Gokoyev T.M., Nikkolova L.S. Temperature field of greenhouse ground when thermoelectric method of heating. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018;55(4):148-152. (In Russ.)
7. Baranov L.A., Burnaev M.G. Device for electrothermal tillage of protected soil. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2007;20:46-49. (In Russ.)
8. Volozhaninov S.S., Aldoshin N.V., Zavaliy 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>
9. Toporkov V.N., Korolev V.A. Intensification of electric pulse processes in agrotechnologies. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;3:1-10. (In Russ.)
10. Jason D. Crisp, Ekaterini Riga, Gordon J. McComb. Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen: patent US12433285B2. Lisi Global Inc. US. 2025.10.07. Appl. No. US18/243,060 filed 2023.09.06. IPC: A01M19/00. URL: US12433285B2 – Method and apparatus for the management of a soil pest or pathogen – Google Patents (Access date: 23.11.2025).
11. Wolf J., Gomes T., Barton T., Damasi D. Electrical resistance heating: rapid treatment for soil and groundwater remediation. *Águas Subterrâneas*. July 2009. URL: (PDF) Electrical Resistance Heating: Rapid Treatment for Soil and Groundwater Remediation (Access date: 23.11.2025).
12. Nikishina O.V., Morozov G.A. Combined soil treatment methods. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022;2(2):51-55. (In Russ.)

Сведения об авторах

- ¹ **Завалий Алексей Алексеевич**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин; zavalyam@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; SPIN-код: 3604-5109
- ² **Алдошин Николай Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин; naldoshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021
- ³ **Воложанинов Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, декан факультета механизации и пищевых технологий; s.volozhaninov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; SPIN-код: 1333-7600
- ⁴ **Волобуев Дмитрий Дмитриевич**, аспирант кафедры общетехнических дисциплин; volobuev99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>; SPIN-код: 9473-4130
- ^{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, 5

Вклад авторов

А.А. Завалий – методология, научное руководство, описание результатов и формирование выводов исследований, создание черновика рукописи;
 Н.В. Алдошин – актуальность проблемы, концептуализация;
 С.С. Воложанинов – проведение исследований, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
 Д.Д. Волобуев – обзор источников литературы, визуализация, проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 14.11.2025, после рецензирования и доработки 28.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Author Information

- Aleksei A. Zavaly**¹, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Department of “General Technical Subjects”; zavalyam@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527
- Nikolay V. Aldoshin**², DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer of the Laboratory of Tillage and Reclamation Machines; naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; Scopus Autor ID: 5719413129; Researcher ID: AAD-6548-2022
- Sergey S. Volozhaninov**³, CSc (Eng), Associate Professor, Dean of the Faculty of Mechanization and Food Technologies; s.volozhaninov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6686-1220>; Scopus Autor ID: 57218094232
- Dmitry D. Volobuev**⁴, postgraduate student of Head of the Department of “General Technical Subjects”; volobuev99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5643-9087>
- ^{1,3,4} V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4 Akademiya Vernadskogo Ave., Simferopol, 295007, Republic of Crimea, Russian Federation
- ² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contribution

A.A. Zavaly – methodology, research supervision, writing – original draft, results and conclusions;
 N.V. Aldoshin – conceptualization;
 S.S. Volozhaninov – investigation, writing – manuscript review and editing;
 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 14.11.2025; Revised 28.04.2026; Accepted 14.05.2026