Научная статья
УДК 631.348.8
doi:10.35694/YARCX.2025.70.2.011

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОФАКТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Артем Сергеевич Угловский[1], Наталья Юрьевна Семеренко[2]
[1, 2]Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
[1]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786
[2]semerenko@yarcx.ru

Реферат. Авторами исследуется эффективность применения высоковольтного напряжения для уничтожения сорных растений (осот). Проведённые эксперименты направлены на оценку влияния различных факторов, включая напряжение, энергию и время воздействия, на степень уничтожения сорных растений. В ходе работы была построена модель линейной регрессии, позволяющая определить взаимосвязь между степенью уничтожения сорных растений и исследуемыми параметрами. Результаты анализа показали, что степень уничтожения сорных растений положительно коррелирует с увеличением напряжения и энергии, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации R^2, равным 0,9658. Определены оптимальные параметры для достижения максимальной степени уничтожения сорных растений: напряжение 25,45–27,00 кВ, энергия 117 Дж и время воздействия 2–4 с. Исследования авторов подчеркивают потенциал использования высоковольтного напряжения как эффективного метода борьбы с сорными растениями, предлагая альтернативу традиционным химическим гербицидам. Исследования могут стать основой для дальнейших разработок в области агрономии и экологии, направленных на оптимизацию технологий уничтожения нежелательной растительности в посевах культурных растений.

Ключевые слова: *сорные растения, высоковольтное напряжение, многофакторный эксперимент, регрессионная модель, осот*

OPTIMIZATION OF WEED REMOVAL PROCESS USING HIGH VOLTAGE IN A MULTIFACTOR EXPERIMENT

Artem S. Uglovskiy[1], Natalya Yu. Semerenko[2]
[1, 2]Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
[1]a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786
[2]semerenko@yarcx.ru

Abstract. The authors investigate the efficiency of high-voltage application for weed control (sow thistle). The experiments were aimed at assessing the influence of various factors including voltage, energy and exposure time on the degree of weed control. In the course of the work, a linear regression model was constructed to determine the relationship between the degree of weed control and the parameters under study. The results of the analysis showed that the degree of weed control positively correlates with an increase in voltage and energy, which is confirmed by a high determination coefficient R^2 equal to 0.9658. The optimal parameters for achieving the maximum degree of weed control were determined: voltage of 25.45–27.00 kV, energy of 117 J and exposure time of 2–4 s. The authors' researches emphasize the potential of using high-voltage tension as an effective method of weed control offering an alternative to traditional chemical herbicides. The research may become the basis for further developments in the field of agronomy and ecology aimed at optimizing technologies for the destruction of unwanted vegetation in the sowings of cultivated plants.

Keywords: *weeds, high voltage, multifactorial experiment, regression model, sow thistle*

Введение. Сорные растения представляют собой одну из основных проблем в сельском хозяйстве, так как они конкурируют с культурными растениями за ресурсы, такие как вода, свет и питательные вещества. Традиционные методы борьбы с сорными растениями, включая использование гербицидов, могут быть не только неэффективными, но и негативно влиять на

окружающую среду. В связи с этим существует необходимость в разработке новых, более эффективных методов уничтожения сорных растений.

В последние годы высоковольтное напряжение рассматривается как перспективный метод уничтожения сорных растений. Данный метод основан на применении электрических импульсов, которые наносят повреждения растительности, приводя к их гибели. В рамках нашего исследования была проведена серия экспериментов, целью которых было определить оптимальные параметры для максимального уничтожения сорных растений (осот) с использованием высоковольтного напряжения.

В эксперименте использовались растения осота, выращенные в контролируемых условиях. Растения были разделены на группы, к каждой из которых применялся определённый режим воздействия высоковольтным напряжением.

В ходе эксперимента были собраны данные по времени воздействия (T_a), минимальному току (I_a) и максимальному напряжению (U_{max}), которые позволили построить регрессионную модель для оценки зависимости между этими параметрами. Полученные результаты показали, что использование высоковольтного напряжения может быть эффективным методом уничтожения сорных растений, обеспечивая значительное снижение их численности при минимальном воздействии на окружающую среду.

Данное исследование направлено на оптимизацию процесса уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного напряжения, что может стать основой для дальнейших разработок в области агрономии и экологии.

Цель исследования – оптимизация параметров высоковольтного воздействия для эффективного уничтожения сорных растений (осот), с использованием метода многофакторного эксперимента.

Материалы и методы исследования. Исследования по уничтожению сорных растений с использованием высоковольтного напряжения проводились в лабораторных условиях. Эксперимент был направлен на оценку эффективности различных параметров, таких как напряжение (V), энергия (E) и время воздействия (T), в процессе уничтожения растений осота.

Для создания высоковольтных импульсов использовалось специальное оборудование, позволяющее регулировать напряжение и энергию импульсов. Разряд осуществлялся между двумя электродами, помещёнными в непосредственной близости от растений.

Изучаемые режимные параметры системы уничтожения сорных растений и уровни их варьирования представлены в таблице 1. Постоянными факторами были установлены следующие значения: напряжение в диапазоне 23–27 кВ, энергия в диапазоне 111–117 Дж и время воздействия в диапазоне 2–6 секунд.

Всего было проведено 30 опытов в трёх повторностях согласно матрице многофакторного эксперимента. Дополнительные данные для проведения исследования были получены из источника [1].

Для проведения эксперимента использовались специально разработанные устройства, которые обеспечивали точное применение высоковольтного напряжения к сорным растениям. Замеры степени уничтожения сорных растений фиксировались с помощью визуального анализа состояния сорных растений через 1, 3 и 7 дней после обработки.

Математическая обработка полученных данных и проверка на адекватность полученных уравнений регрессии произведена согласно методическим указаниям Ю. П. Адлера [2], а также с использованием программного обеспечения Python и библиотек для статистического анализа, таких как sklearn и scipy. Результаты заносились в лабораторный журнал для дальнейшего анализа и интерпретации.

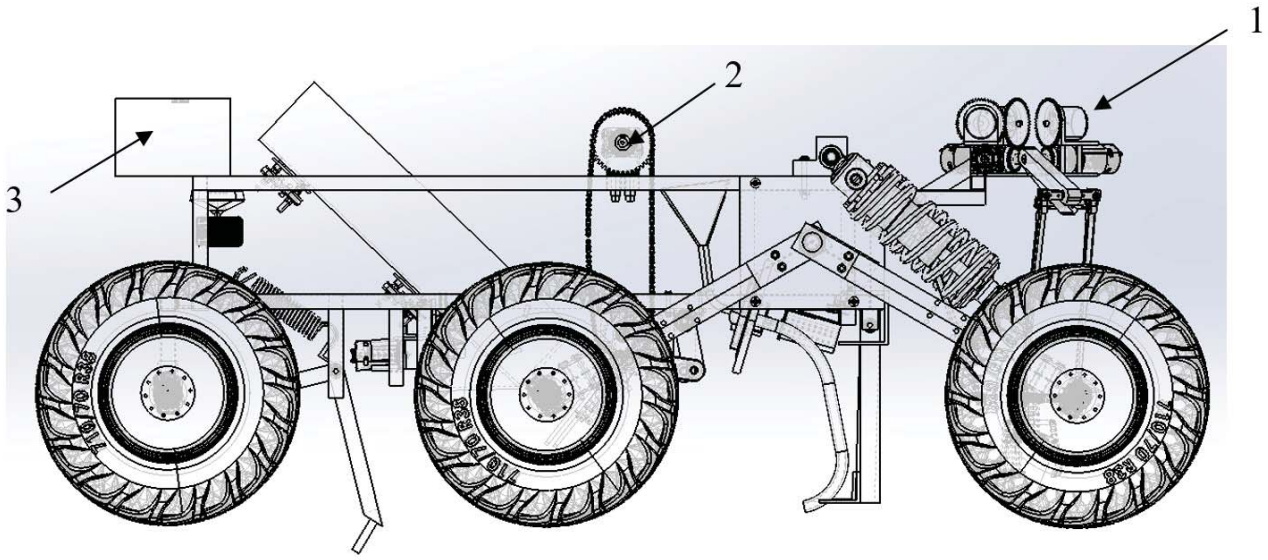
Мобильная платформа с использованием механизма уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного напряжения с разрядным током представлена на рисунке 1. Робот будет адаптирован для различной ширины междурядий на полях с посевами сельскохозяйственных культур, а также с учётом различных схем посева и посадки, чтобы минимизировать повреждения культурных растений [3].

Манипулятор робота состоит из двух электродов, закреплённых на конце дельта-робота (рис. 2). Одна пара зажимов используется для механического удаления сорных растений, а вторая с высоковольтными электродами – для электрического разряда.

При приложении высокой электрической энергии почва и воздух, благодаря высокой электрической прочности, остаются невредимыми, но куст сорного растения, из-за ограниченной электрической прочности, нагревается, что приводит к испарению биомассы и разрушению ткани сорного растения. В конечном итоге внутренняя структура куста сорного растения разрушается и

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

Уровень варьирования	Фактор		
	приложенное напряжение, кВ (U)	энергия уничтожения сорных растений, Дж (E)	время уничтожения сорных растений, с (T)
–1	23	111	2
0	25	113	4
+1	27	115	6



1 – манипулятор с электродвигателями; 2 – электропривод механизма подачи семян; 3 – блок системы управления.

Рисунок 1 – Схема мобильной платформы робота

выходит из цепи, и электрический ток в датчике снижается до незначительного значения.

Мобильная платформа робота использует датчик тока ACS712, подключённый к системе управления для регулирования процессом уничтожения сорных растений. Когда высоковольтный электрод соприкасается с сорным растением, ток, проходящий через него, увеличивается, что сигнализирует о начале процесса уничтожения. После завершения процедуры ток снижается, что позволяет системе определить, было ли растение успешно уничтожено [3–4].

Результаты исследования. Для оценки влияния факторов на степень уничтожения сорных растений (осот) была построена модель линейной регрессии. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot E + b_3 \cdot T_a, \quad (1)$$

где b_0 – свободный член; b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, соответствующие факторам.

В данной работе была проведена линейная регрессия для анализа зависимости степени уничтожения сорных растений (y) от трёх факто-

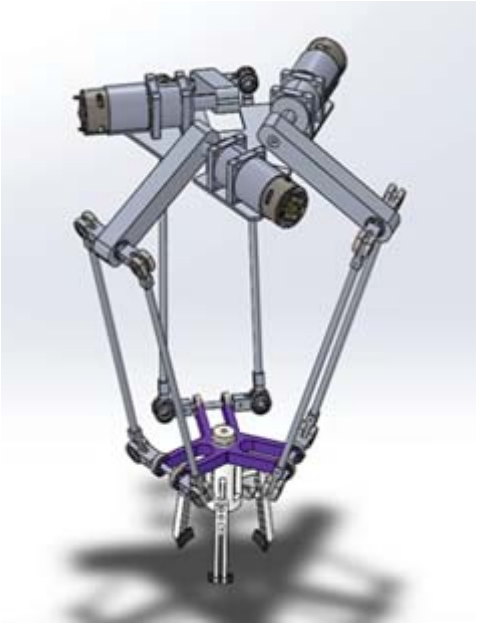
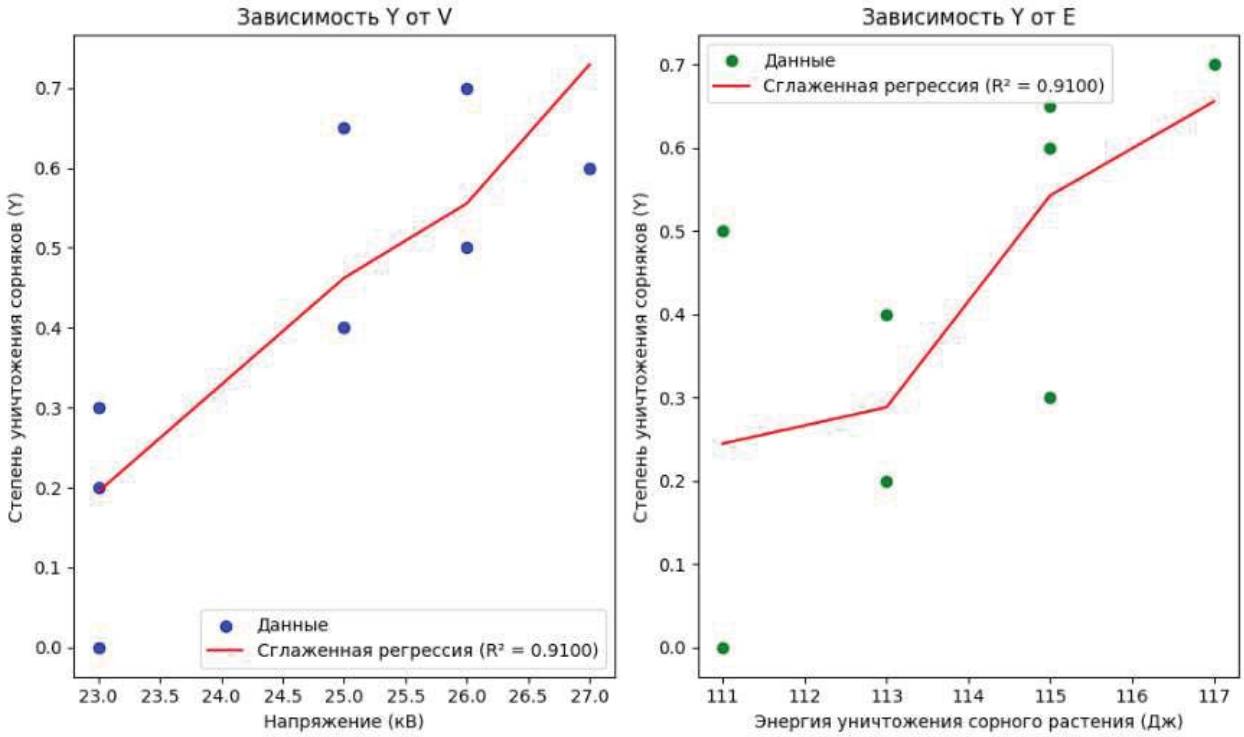


Рисунок 2 – Схема манипулятора робота



а) б)

Рисунок 3 – Зависимость степени уничтожения сорных растений (y) от напряжения (U) (а) и зависимость степени уничтожения сорных растений (y) от энергии (E) (б)

ров: напряжения (U), энергии (E) и времени (T_a). Результаты представлены в виде графиков, которые визуализируют эти зависимости (рис. 3).

Уравнение регрессии:

$$y = -14{,}0294 + 0{,}2350 \cdot U + 0{,}0806 \cdot E - 0{,}1417 \cdot T_a. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0{,}91$.

На графике 3а представлена зависимость степени уничтожения сорных растений от напряжения (U). Точки на графике представляют собой исходные данные, а красная линия – сглаженная регрессионная кривая.

Из графика видно, что с увеличением напряжения степень уничтожения сорных растений также увеличивается. Данный график указывает на положительную корреляцию между напряжением и эффективностью уничтожения сорных растений. Стоит отметить, что после достижения определённого уровня напряжения эффект может начать снижаться, что требует дальнейшего изучения.

На графике 3б представлена зависимость степени уничтожения сорных растений от энергии (E). График показывает, что увеличение энергии также приводит к увеличению степени уничтожения сорных растений. Однако, как и в случае с напряжением, необходимо учитывать, что эффективность может достигать предела, после которого дальнейшее увеличение энергии не даёт значительного эффекта.

Сравнивая оба графика, можно заметить, что напряжение и энергия имеют схожие тенденции в отношении их влияния на степень уничтожения сорных растений. Это может свидетельствовать о том, что эти два параметра взаимосвязаны и могут влиять друг на друга.

Оптимальные параметры для данной системы: U = 27 кВ; E = 117 Дж; T = 4 с.

Анализ поверхности отклика (рис. 4) в данном исследовании позволяет визуализировать взаимосвязь между временем уничтожения сорных растений (T_a), минимальным током (I_a) и степенью уничтожения сорных растений (y).

График (рис. 4) показывает криволинейную поверхность зависимости между временем уничтожения, минимальным током и максимальным временем. Это подтверждает нелинейный характер взаимодействия факторов.

Уравнение регрессии:

$$y = -1{,}0028 - 0{,}2454 \cdot T_a + 0{,}9440 \cdot I_a + 0{,}0593 \cdot T_a^2 - 0{,}0645 \cdot T_a \cdot I_a + -0{,}0720 \cdot I_a^2. \quad (3)$$

Уравнение регрессии показывает, что степень уничтожения сорных растений (y) положительно зависит от минимального тока (I_a) и времени (T_a). Это означает, что увеличение этих

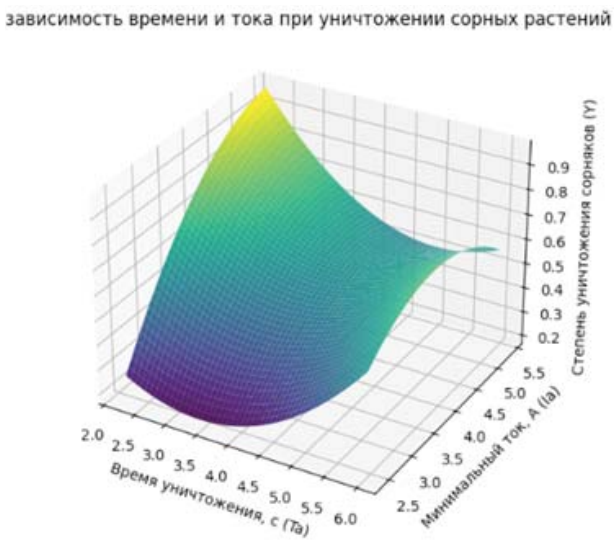


Рисунок 4 – Зависимость времени и тока при уничтожении сорных растений

параметров приводит к более высокой степени уничтожения сорных растений. Однако также стоит отметить, что наличие квадратичных и взаимодействующих членов в уравнении указывает на сложный характер этой зависимости, что может потребовать дальнейшего анализа для определения оптимальных условий.

Коэффициент детерминации (R^2) составляет 0,9658, что указывает на высокую степень объяснения вариации в степени уничтожения сорных растений. Модель адекватно описывает зависимость между независимыми переменными (время и ток) и зависимой переменной (степень уничтожения – технологическая эффективность).

Оптимальные параметры системы: T_a = 2,00 с; Ia = 5,26 А; U = 25,45 кВ.

Серия предварительных неконтролируемых испытаний помогла определить дозы разрядного тока, вызывающие заметные реакции у сорных растений, с последующим включением значений параметров в многофакторный эксперимент. Наблюдения показали, что в большинстве случаев видимые симптомы проявлялись не ранее чем через 6 дней после обработки. В связи с этим, наши эксперименты продолжались до тех пор, пока не становилось очевидно, что сорные растения полностью погибли (проявляли признаки полного увядания, естественного отделения корней и побегов) [5–8].

Выводы. В ходе проведённого исследования была проанализирована эффективность применения высоковольтного напряжения для уничтожения сорных растений (осот). Результаты эксперимента показали, что степень уничтожения сорных растений значительно зависит от параметров, таких как напряжение, энергия и время воздействия.

Модель линейной регрессии, построенная для оценки зависимости степени уничтожения (y) от напряжения (U), энергии (E) и времени (T), показала высокую степень объяснения вариации зависимой переменной, что подтверждается коэффициентом детерминации R^2, равным 0,9658. Это указывает на то, что модель адекватно описывает взаимосвязь между факторами и степенью уничтожения.

Оптимальные параметры для достижения максимальной степени уничтожения были определены, как напряжение 25,45–27 кВ, энергия 117 Дж и время воздействия 2–4 с. Эти значения обеспечивают наилучший результат в борьбе с сорными растениями, что подтверждается визуализацией данных и графиками, демонстрирующими положительную корреляцию между увеличением напряжения и степенью уничтожения.

Данная работа может стать основой для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию технологий уничтожения нежелательной растительности в посевах сельскохозяйственных культур.

Список источников

1. Бренина Т. П. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности электроимпульсного уничтожения корнеотпрысковых сорняков : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Сарат. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова. Саратов, 2006. 231 с.

2. Adler Y. P., Markova E. V., Granovsky Y. V. Planning of Experiment in Finding the Optimal Conditions. Nauka, Moscow, 1976. 255 p.

3. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Автоматизированная система уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и механизма обратной связи // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 1 (122). С. 104–120. DOI 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119. EDN BOAOTK.

4. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Мобильная система для уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и обратной связи на основе датчика тока // Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 4 (45). С. 26–33. EDN SACMNZ.

5. McCool C., Beattie J., Firn J. [et al.] Efficacy of Mechanical Weeding Tools: A Study Into Alternative Weed Management Strategies Enabled by Robotics // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3, Is. 2. P. 1184–1190.

6. Vigneault C., Benoit D. L. Electrical Weed Control: Theory and Applications // Physical Control Methods in Plant Protection. Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2001. P. 174–188. DOI 10.1007/978-3-662-04584-8_12.

7. Lati R. N., Rosenfeld L., David I. B., Bechar A. Power on! Low-energy electrophysical treatment is an effective new weed control approach // Pest Management Science. 2021. Vol. 77, Is. 9. P. 4138–4147. DOI 10.1002/ps.6451.

8. Sahin H., Yalınkılıc M. Using Electric Current as a Weed Control Method // European Journal of Engineering Research and Science. 2017. Vol. 2, № 6. P. 59–64. DOI 10.24018/ejers.2017.2.6.379.

References

1. Brenina T. P. Rasshirenie tekhnologicheskih vozmozhnostej i povyshenie effektivnosti elektroimpul'snogo unichtozheniya korneotpryskovyh sornyakov : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.20.02 / Sarat. gos. agrar. un-t im. N. I. Vavilova. Saratov, 2006. 231 s.

2. Adler Y. P., Markova E. V., Granovsky Y. V. Planning of Experiment in Finding the Optimal Conditions. Nauka, Moscow, 1976. 255 p.

3. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Avtomatizirovannaya sistema unichtozheniya sornyh rastenij s ispol'zovaniem vysokovol'tnogo razryada i mekhanizma obratnoj svyazi // AgroEkoInzheneriya. 2025. № 1 (122). S. 104–120. DOI 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119. EDN BOAOTK.

4. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Mobil'naya sistema dlya unichtozheniya sornyh rastenij s ispol'zovaniem vysokovol'tnogo razryada i obratnoj svyazi na osnove datchika toka // Agrotekhnika i energoobespechenie. 2024. № 4 (45). S. 26–33. EDN SACMNZ.

5. McCool C., Beattie J., Firn J. [et al.] Efficacy of Mechanical Weeding Tools: A Study Into Alternative Weed Management Strategies Enabled by Robotics // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3, Is. 2. P. 1184–1190.

6. Vigneault C., Benoit D. L. Electrical Weed Control: Theory and Applications // Physical Control Methods in Plant Protection. Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2001. P. 174–188. DOI 10.1007/978-3-662-04584-8_12.

7. Lati R. N., Rosenfeld L., David I. B., Bechar A. Power on! Low-energy electrophysical treatment is an effective new weed control approach // Pest Management Science. 2021. Vol. 77, Is. 9. P. 4138–4147. DOI 10.1002/ps.6451.

8. Sahin H., Yalınkılıc M. Using Electric Current as a Weed Control Method // European Journal of Engineering Research and Science. 2017. Vol. 2, № 6. P. 59–64. DOI 10.24018/ejers.2017.2.6.379.

Сведения об авторах

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Наталья Юрьевна Семеренко – старший преподаватель кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет».

Information about the authors

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 3717-5731.

Natalya Yu. Semerenko – senior lecturer of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.