Электроимпульсная борьба с сорняками как элемент органического земледелия в устойчивом сельском хозяйстве

И. В. Юдаев*, Ю. В. Даус, И. В. Шаров

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, 350044, Россия, *e-mail: etsh1965@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.07.2025
После доработки 22.07.2025
Принята к публикации 26.07.2025

Предлагается для борьбы с сорняками использовать инновационные способы, в частности электроимпульсную прополку. Изучение электропроводных свойств растительной ткани сорняков и цепей протекания тока обработки, выявление варианта подведения электрической энергии и повреждающих доз энергии позволили обосновать структуру агрегата, состоящего из движителя (колесного трактора) и электротехнологической установки, а также оценить экономическую и агротехнологическую эффективность его применения в технологиях земледелия. Анализ совокупных энергетических затрат при электроимпульсной обработке почвенных площадей от сорных и нежелательных растений и их оценка при возделывании озимой пшеницы показали, что такая обработка менее энергозатратная по сравнению с механической культивацией и химической прополкой на площади 100 га, а также реализуется с минимальным негативным влиянием на окружающую среду.

Ключевые слова: борьба с сорняками, электроимпульсная прополка, технологическая эффективность, экологическая безопасность, структура электроимпульсного пропольщика, параметры и характеристики процесса

УДК 632.935.9+631.348.8
https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.4.45

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивые формы ведения эффективного хозяйствования на земле в целях получения необходимого количества качественной продовольственной продукции для нормальной жизнедеятельности населения сегодня неразрывно связаны с изменением фитосанитарного состояния посевов и насаждений, а также с качеством структуры почвенного покрова сельскохозяйственных угодий и соседствующих с ними территорий [1, 2].

В мировом земледелии насчитывается около 1800 видов сорняков, произрастание которых на сельскохозяйственных угодьях приводит к потере урожая возделываемых культур на 31,5%, что эквивалентно экономическим потерям в размере 32 млрд долларов США в год [3]. Важным фактором, формирующим сельскохозяйственную среду – среду, благоприятную для роста и развития выращиваемых растений, является обработка почвы, которая в свою очередь изменяет разнообразные ее физические, химические и биологические свойства и является ключевым фактором для устойчивого использования ее плодородного слоя [4, 5]. Традиционно применяемая механическая обработка почвы, несмотря на историческую сформированность (наличие) технических средств и технологическую обоснованность способов реализации, оказывает сильное влияние на саму природную среду, так как истирает верхний плодородный слой, снижает содержание гумуса, уплотняет почву и увеличивает потерю влаги, приводит к почвенной эрозии и т.п. Кроме того, такая обработка характеризуется существенной энергоемкостью процессов, становясь при этом дорогостоящим элементом технологии возделывания сельскохозяйственных культур [6]. Интенсификация технологических процессов в сельском хозяйстве и применение землепользователями вполне доступных, но не всегда экологически безопасных химикалиев дополнительно к уже существующим проблемным обрабатываемым почвенным площадям прибавило еще и площади с неблагополучным экологическим состоянием, на которых присутствуют остатки гербицидов и пестицидов, следы которых обнаружены как в почве, так и в грунтовых водах [7]. Кроме этого, на сельскохозяйственных угодьях увеличилось количество сорняков с повышенной устойчивостью и резистентностью последних к повреждающему их воздействию. Сегодня насчитывается около 380 биологических видов сорных растений, устойчивых к гербицидам [8–10]. На этом фоне не сокра-

щаются и ареалы трудно-искоренимых, карантинных, инвазивных сорняков как на благополучном для их произрастания юге, так и в целом по стране [11]. Поэтому для повышения технологической эффективности борьбы с сорными и нежелательными растениями сегодня предлагаются различные новые экологически безопасные способы их физического уничтожения, к которым относится и применение повреждающих воздействий электрической природы [12–16].

Исторически электрическую энергию начали рекомендовать для борьбы с нежелательной растительностью, произрастающей вдоль железнодорожных путей и дорог еще в конце XIX века. Так, в Северной Америке были предложены на уровне патентных документов конструкции установок, перемещающихся по рельсам и вырабатывающих электрическую энергию от приводящей во вращение электрический генератор паровой машины, а сами электрические воздействия предлагалось подводить посредством прямого контакта с растениями электродной системы и тем самым необратимо повреждать внутренние структуры сорняков, выросших на железнодорожных путях или вдоль них [17]. Эволюция технических средств привела к тому, что в 1930–1940-е гг. были получены патентные решения и даже изготовлены первые действующие установки, применение которых позволяло на засоренных площадях успешно бороться с нежелательной растительностью и вредными насекомыми [18]. В 70–80-х гг. XX века компании – производители сельскохозяйственной техники начали проектировать и выпускать электротехнологические установки (Lasco LW5 Lightning Weeder; Bolter Destroyer; Ervard l'Agrichoc; ЭРПИК), агрегатируемые зачастую с колесными тракторами, которые с высокими показателями агротехнологической эффективности уничтожали нежелательную растительность [19–23]. Но в тот исторический период времени широкая химизация технологических процессов в земледелии не оставила шансов новым способам и техническим средствам. Повторное и более пристальное внимание к технологии борьбы с сорняками при помощи электрической энергии было уже обращено в XXI веке, когда последствия применения ядохимикатов и разнообразных химикалиев начали негативно сказываться на экологической обстановке, популяциях местных животных и птиц, здоровье людей и т.п. [24]. Поэтому сегодня электротехнологические установки для электрической прополки ассоциируют прежде всего с экологически чистым, регенеративным или органическим земледелием, при этом их работа на полях и угодьях обоснованно характеризуется высокими показателями технологической эффективности и более низкими затратами совокупной энергии на процесс уничтожения сорной и нежелательной растительности [25, 26].

Выпускаемые сегодня в Европе, Северной и Южной Америке электротехнологические агрегаты, или как еще их называют электротехнические машины (Lightning Weeder; Weed Zapper; NUCROP; XPower; RootWave), заняли существенную нишу в агротехнологических операциях, выполняя полевые работы по уничтожению сорной и нежелательной растительности, борясь с трудноискоренимыми, карантинными и инвазивными сорняками и не оставляя при этом за собой негативных антропогенных последствий [16, 17].

В то же время еще нет окончательного, обоснованного с научной и практической точек зрения решения по таким возникающим вопросам, как: вид повреждающего электрического воздействия (переменный или импульсный ток); обоснование структуры и конструкции электротехнологического устройства (прицепное или навесное исполнение); способ подведения электрических повреждающих воздействий; электропроводные характеристики цепей протекания токов обработки, в том числе и электрофизические свойства сорных растений; конструкция электродной системы (высота подвеса, гладкая или с режущими частями форма поверхности отдельных электродов, наличие секционирования электродной системы и т.д.); основные технологические показатели обработки почвенных площадей с применением электротехнологических установок (напряжение обработки, энергия необратимого повреждения различных видов сорных растений, производительность, скорость перемещения по участкам, время контакта с сорными растениями и др.); требования и положения по эффективной и безопасной эксплуатации, опирающиеся на научное и практическое обоснование; энергетическая и экономическая привлекательность метода [13, 16, 17].

Цель статьи – обоснование структуры и конструкции электротехнологической установки, агрегатируемой с колесным трактором и применяемой для борьбы с сорными растениями при помощи высоковольтных электрических воздействий, в соответствии с экспериментально обоснованными режимами и параметрами разработанной электротехнологии.

МЕТОДИКА, ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В стране и за рубежом в XX и начале XXI века учеными-исследователями была доказана эффективность электроимпульсной прополки сельскохозяйственных угодий и экспериментально подтверждено положительное действие высоковольтных импульсов для необратимого повреждения внутриклеточных компонентов растительных тканей сорняков [27–32].

На основании результатов экспериментальных исследований и изучения процесса электрообработки растений подсолнечника и табака, а также различных видов сорняков было проведено сравнение эффективности применения для этих целей таких видов тока, как синусоидальный и импульсный. Теоретическое сравнение энергетически равных синусоидальных и импульсных токов при воздействии на растительные ткани для достижения летальных (необратимых) повреждений позволило выявить, что электрообработка растительных объектов импульсами разрядного напряжения эффективнее воздействия равной энергии синусоидального напряжения, а само импульсное воздействие на растительные ткани эффективнее воздействия синусоидального напряжения в 1,7 раза. Экспериментальная проверка полностью подтвердила теоретические выводы об эффективности импульсного электрического тока по сравнению с синусоидальным, так как глубина необратимого повреждения (степень разрушения внутриклеточных компонентов) тканей различных растений (табака, подсолнечника, сорных растений и др.) при электроимпульсной обработке больше в 1,3–3,4 раза [31].

Технологическая эффективность электроимпульсного уничтожения сорных растений характеризуется необратимым повреждением внутриклеточных компонентов, поддерживающих нормальную жизнедеятельность их растительных тканей. Энергетические показатели этой электротехнологической операции, характеризующие ее технологическую эффективность, зависят от минимальных затрат электрической энергии, которую необходимо подвести к растению для того, чтобы степень повреждения тканей сорняков (глубина «разрушения» клеточных структур), и в первую очередь их корневой системы, достигла предельного значения. Сложность конструкции проектируемого технического средства и его стоимость в значительной мере определяются используемым для обработки сорных трав уровнем напряжения обработки: чем оно ниже, тем проще и дешевле установка, а также безопаснее ее эксплуатация.

Анализ чувствительности растительной ткани сорняков к воздействию электрическими импульсами высокого напряжения и изменение расчетных параметров ее принципиальной электрической схемы замещения позволили сформулировать рабочую гипотезу, объясняющую необратимое электроповреждение обрабатываемых тканей сорняков. Электрическое полное сопротивление ткани снижается вследствие того, что клеточные мембраны теряют свои полупроницаемые свойства, а их активная составляющая полного сопротивления в процессе электроимпульсной обработки и активное сопротивление внутриклеточного и межклеточного «растворов» выравниваются, по величине становясь равными активному сопротивлению «раствора» протоплазмы. Это происходит в результате того, что выходящий из поврежденной электрическими импульсами клетки через открывшиеся поры в стенке мембраны вакуолярный сок, имеющий самую высокую электрическую проводимость, смешивается с межклеточной жидкостью и не только изменяет величину pH полученного «раствора», но и снижает общее электрическое сопротивление до уровня электрического сопротивления жидкости. Образовавшийся «раствор» из межклеточной и внутриклеточной жидкостей также заполняет и открывшиеся в мембранной стенке поры, которые под действием электрического поля высокой напряженности утрачивают способность к избирательному пропусканию «ионных потоков» востребованных клеткой питательных компонентов. В результате этого высокое по значению активное сопротивление мембраны шунтируется более низким сопротивлением смешанной межклеточной и внутриклеточной жидкости в порах, что также определяет момент исчезновения такого электрического компонента схемы замещения ткани, как «мембранная емкость» [33].

Для изучения электропроводных свойств растительных тканей сорняков применялся исследовательский подход, при котором: измерялось электрическое сопротивление участка надземной или подземной части растения на частоте измерительного тока 10 кГц, что позволяло снизить влияние приэлектродной поляризации и двойного электрического слоя на результаты измерения; фиксиро-вались его геометрические параметры, после чего определялось удельное электрическое сопро-тивление тканей сорных трав [34, 35].

Экспериментальное изучение электропроводных свойств и характеристик расти-

тельных тканей сорняков как объектов воздействия при электроимпульсной прополке позволило выявить тот факт, что удельное электрическое сопротивление тканей корневой системы имеет наибольшее значение, а стеблей – наименьшее, и при этом значение данного электрофизического параметра возрастает с периодом их роста и развития [34].

Параллельно проведенные исследования по изучению электропроводных свойств позволили также выявить тот факт, что внутренние ткани растений имеют меньшее электрическое сопротивление, чем наружные покровные ткани или эпидермис (экзодермис). Экспериментально полученные данные характеризовались большим значением параметров у растительной ткани стеблей сорных растений по сравнению с покровными тканями их корневой системы [35].

Анализ полученных данных по изучению электропроводных свойств тканей сорных трав разных биологических видов показал, что практически у всех у них сопротивление корневых систем больше, чем у листостебельной части, а покровных тканей – по сравнению с внутренними, но в то же время сами измеренные значения этих сопротивлений перемежаются между собой, не позволяют предварительно, перед электрической обработкой, используя полученные данные, разделить их по биологическим видам на сорняки с большим сопротивлением и, следовательно, более устойчивых к электрическому повреждающему воздействию, и наоборот, с меньшим сопротивлением – минимально сопротивляющихся повреждению.

Электрическое сопротивление растительной ткани сорняков в процессе обработки их электрическими импульсами высокого напряжения снижается, и об этом говорилось ранее в опубликованном материале [36]. Интенсивность (степень разрушения внутриклеточных компонентов), которая могла бы характеризовать такое снижение, было принято оценивать степенью повреждения растительной ткани, которая представляет собой отношение сопротивления ткани, измеренного в конкретный момент времени обработки, к начальному сопротивлению этой же ткани до обработки, выполненных на частоте измерительного тока (10 кГц), при которой можно минимизировать влияние на результат приэлектродных поляризационных явлений.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволяет констатировать, что большая по значению степень повреждения фиксировалась у надземной (листостебельной) части сорняков, а наименьшая – у их корневых систем. Экспериментально также было выявлено, что в процессе развития растений степень повреждения растительных тканей надземных и подземных органов сорных трав несколько уменьшается, что можно объяснить увеличением электрического сопротивления этих тканей по мере роста сорняков. Здесь следует также отметить тот экспериментально зафиксированный факт, что зачастую большую по значению степень повреждения имеют ткани однолетних сорняков (щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*); марь городская *(Oxybasis urbica L.)* горец птичий (*Polygonum aviculare L.*) и др.) по сравнению со степенью повреждения тканей многолетних сорняков (осот розовый (*Cirsium arvense L.*); осот полевой (*Sonchus arvensis L.*); вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*) и др.), но отдельно следует сказать, что исследования проводились в условиях лаборатории и это могло внести свои коррективы по сравнению с полевыми опытами.

Чтобы оценить основные характеристики выходного блока технического средства, а также обосновать конструкцию электродной системы экспериментально изучалась проводимость цепей протекания тока обработки сорняков в условиях их естественного произрастания – полевых условиях. Анализ результатов исследований показал, что электрическое сопротивление цепи обработки «навесной электрод–растение–почва–растение–другой навесной электрод», по которой протекает повреждающий внутриклеточные компоненты ток: 1) линейно возрастает с увеличением расстояния между обрабатываемыми растениями; 2) убывает по квадратичной зависимости с увеличением диаметра обрабатываемых растений; 3) возрастает при увеличении высоты подвеса электродной системы; 4) уменьшается по степенной зависимости с увеличением влажности почвы на исследуемом участке. Полученные исследовательские данные по электропроводным свойствам цепей протекания тока обработки позволяют говорить о том, что: 1) электроимпульсную прополку наиболее эффективно проводить в периоды ведения полевых работ, когда влажность почвы достигает значения 20–30%, что характеризуется минимальным значением удельного электрического сопротивления почвы и позволяет эффективно эксплуатировать сельскохозяйственную технику; 2) для минимизации затрат энергии при уничтожении сорных растений электрический контакт со стеблями сорняков следует устанавливать на как можно меньшей высоте над землей, то есть как можно ближе к корневой шейке, но не допуская электрического пробоя на почву или контакта с ней.

Экспериментальным путем также было выявлено, что затраты электрической энергии на

уничтожение некоторых видов сорных трав, находящихся в фазе развития «начало созревания» и обладающих наибольшим электрическим сопротивлением растительной ткани, при их обработке в местах их естественного произрастания импульсами с амплитудой напряжения 18–20 кВ и частотой следования импульсов до 10 Гц составляют следующие диапазоны значений: для осота розового (*Cirsium arvense L.*) – 102–134 Дж; для осота полевого (*Sonchus arvensis L.*) – 134–186 Дж; для молочая лозного (*Euphorbia waldsteinii L.*) – 570–740 Дж; для молокана татарского (*Lactuca tatarica L.*) – 64–104 Дж; для вьюнка полевого (*Convolvulus arvensis L.*) – 172–212 Дж; для щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus L.*) – 34–106 Дж; для дурнишника обыкновенного (*Xanthium strumarium L.*) – 106–212 Дж; для конопли сорнополевой (*Cannabis ruderalis L.*) – 72–140 Дж; для мари городской (*Oxybasis urbica L.*) – 65–123 Дж [37].

Для обоснования агротехнологической эффективности рассматриваемой электротехнологии следует отметить, что при электрической обработке вдоль стеблей сорных растений прикладываемое начальное напряжение разрядного контура определяет значение напряженности электрического поля в растительной ткани. Интерес представляет ее значение, при котором степень повреждения ткани растения достигает предельного (максимального) значения. Именно создание такой напряженности в растительной ткани приводит к гибели сорной травы, на которую воздействовали импульсами высокого напряжения [38].

Проанализировав полученные результаты лабораторных и полевых исследований, можно отметить, что растения в разные годы исследований и периоды развития, произраставшие на различных почвенных участках, имели существенные отличия в повреждающих значениях напряжений. При этом затраты минимальных удельных повреждающих количеств энергии были также различны. Степень повреждения растительной ткани корневой системы и листостебельной части различных сорняков растет с увеличением напряженности электрического поля в ткани и достигает своего предельного значения при 3,36–3,85 кВ/см. Для надежного повреждения растительных тканей корневой системы исследованных сорняков в них необходимо создать напряженность электрического поля значением не менее 3,85 кВ/см, а для повреждения надземной части – 3,68 кВ/см.

Реализацию способа уничтожения сорных трав высоковольтными импульсами следует рассматривать как применение экологически чистых агротехнических операций в органическом земледелии; попытку максимального подавления жизнедеятельности и последующей гибели наиболее вредоносных и трудноискоренимых сорняков; осуществление избирательного уничтожения очагов и куртин распространения карантинных и инвазивных сорных растений и т.п.

Одной из основополагающих проблем в свете рекомендации к широкому внедрению электроимпульсной прополки является экологическая безопасность способа для окружающей среды, что особенно важно для населяющей почву полезной микрофлоры и почвенных микроорганизмов. Анализ результатов исследований авторов по воздействию электрических полей, в том числе электрических разрядов на микрофлору почвы, а также живущих в ней организмов (например, дождевых червей и подземных членистоногих) позволяет заключить, что явного негативного влияния на агрофитоценоз почвы не наблюдается. Такое заключение позволяет характеризовать электроимпульсную прополку как экологически чистую технологию в растениеводстве, которая не только не загрязняет окружающую среду, но и минимально негативно воздействует на микрофлору почвы [16].

ОБСУЖДЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Результаты многолетних исследований по изучению электрофизических свойств и характеристик сорных растений как объектов электрического воздействия, а также анализ технических конструкций существующих и проектируемых установок позволяет определить их основные элементы и обосновать построение рациональной структуры технического средства – электротехнологической установки для уничтожения сорняков электрическими импульсами высокого напряжения. Ее конструкция может быть представлена в одном из следующих видов: 1) электротехнологическая установка из комплектно изготовленных элементов и блоков, навешиваемых на опорные конструкции движителя с источником электрической энергии, сочлененным с валом отбора мощности (ВОМ) трактора; 2) прицепная электротехнологическая установка, изготовленная как отдельная комплектно собранная конструкция, с источником электрической энергии, которая также согласованно работает с ВОМ; 3) электротехнологическая установка, которая представляет

собой отчасти навесное электротехническое оборудование, формирующее повреждающие воздействия электрической природы и подводящее их к обрабатываемым растениям, а также прицепной мобильный источник электроэнергии с механическим приводом от ВОМ трактора.

Принципиально конструкция агрегата, включающего в себя и электротехнологическую установку, должна состоять из следующих структурных компонентов: 1) силовая установка перемещения по почвенной площади, например, колесный пропашной трактор; 2) источник электрической энергии; 3) повышающий уровень напряжения трансформатор; 4) преобразователь электрической энергии в технологически необходимый вид; 5) электродная система для подведения необратимо повреждающей дозы электрической энергии к сорным и нежелательным растениям. В качестве предлагаемого технического решения рассмотрим конструкцию электротехнологической установки, агрегатируемой с колесным пропашным трактором и состоящей из навешиваемого электротехнического оборудования (блок формирования электрических воздействий, электродная система, блоки управления и контроля) и прицепного источника электрической энергии, сочлененного с ВОМ трактора (рис. 1).

Использовать предлагаемую конструкцию агрегата предполагается для уничтожения сорных растений как при сплошном уничтожении сорняков, например, на паровых или залежных почвенных площадях, так и в междурядьях пропашных культур, в последнем случае выбрав для этого пропашной колесный трактор, у которого величина дорожного просвета максимальная и колея рассчитана для прохождения как раз в междурядьях культурных растений. Наиболее распространены в нашей стране универсально-пропашные колесные тракторы «Беларусь».

В качестве первичного источника электрической энергии целесообразно использовать синхронный генератор, имеющий относительно малую стоимость и позволяющий с помощью обычного повышающего трансформатора получить любое значение высокого напряжения, необходимого для работы агрегата. Для устойчивой работы привода генератора следует использовать ВОМ колесного трактора, а в качестве передающего устройства рекомендуется применять карданный вал. Проанализировав энергетические параметры приводного устройства электрического генератора – ВОМ трактора «Беларусь» [39], были сделаны следующие заключения:

1. При разной снимаемой нагрузке изменение частоты вращения ВОМ отличается от номинальной не более чем на 5–6%, что характерно для работы стандартного колесного трактора на второй передаче, на других же передачах эти колебания еще меньше. Напряжение, вырабатываемое генератором, изменяется пропорционально скорости оборотов ВОМ, поэтому при таких колебаниях необходимость регулирования напряжения отпадает.

2. Максимально возможная мощность, снимаемая с ВОМ, колеблется в зависимости от конкретной передачи. Ступенчатое переключение передач изменяет скорость движения агрегата и составляет от 45 кВт на второй до 2,7 кВт – на восьмой.

3. Масса навешиваемой установки влияет на максимально возможную снимаемую с ВОМ мощность, поэтому улучшение эксплуатационных показателей агрегата за счет применения утяжеляющих конструкцию элементов надо рассматривать очень внимательно и без большой надобности утяжелять установку не следует.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что для необратимого повреждения внутриклеточных структур и последующей гибели сорняков необходимо использовать напряжение амплитудным значением до 20–25 кВ. Поэтому нагрузкой синхронного генератора 220/380 В служит преобразователь, основной элемент которого – повышающий трансформатор, с масляной или сухой изоляцией. Кроме того, необходимо использование конструктивных блоков: выпрямления и умножения напряжения, а также формирования высоковольтных импульсов или, что также технически реализуемо, в качестве альтернативного решения – импульсного трансформатора с электронным блоком управления. Здесь следует отметить, что экспериментальные исследования выявили высокую эффективность необратимых нарушений жизнедеятельности внутриклеточных компонентов растительных тканей сорняков при воздействии на них короткими импульсами с высокой скоростью нарастания напряжения по фронту импульса. Поэтому можно говорить, что использование импульсного высоковольтного трансформатора все же следует рассматривать как резервный вариант комплектования установки.

Исключительно важным является конструктивное исполнение компонента подведения электрических воздействий к растениям. Система для подведения электрической энергии к сорнякам представляет собой совокупность специальных электродов, которые должны отве-

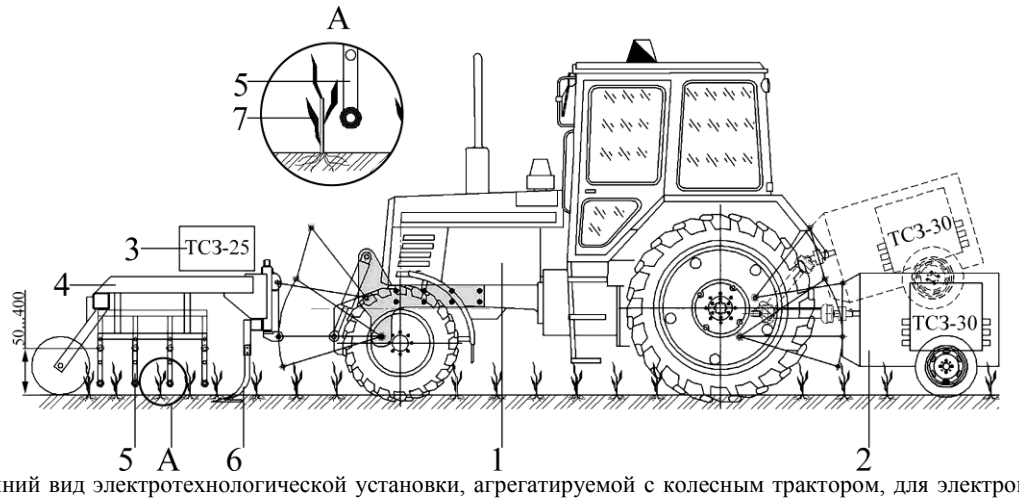


Рис. 1. Внешний вид электротехнологической установки, агрегатируемой с колесным трактором, для электроимпульсного уничтожения сорной и нежелательной растительности: *1* – колесный трактор; *2* – источник электрической энергии (синхронный генератор, приводимый во вращение ВОМ и повышающий трансформатор); *3* – формирователь высоковольтных электрических импульсов (генератор импульсов высокого напряжения); *4* – навесная рама промышленного культиватора; *5* – секции навесных электродов; *6* – заглубленный в почву электрод; *7* – сорное растение.

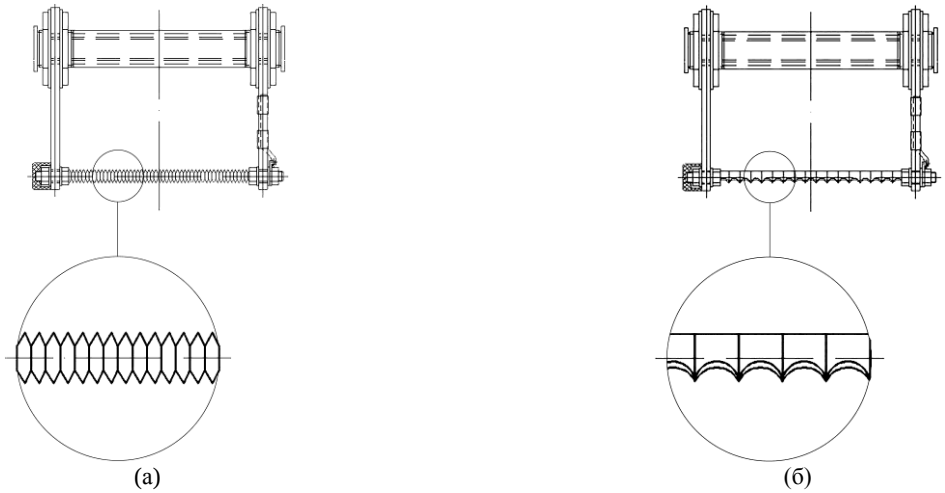


Рис. 2. Варианты навесных электродных секций: (а) – с цилиндрическим рабочим органом, имеющим вертикальные проточки с режущей кромкой; (б) – с пластинчатым рабочим органом с острыми вершинами и режущей дугообразной частью.

чать ряду требований: 1) обеспечивать качественный электрический контакт с уничтожаемым сорным растением, создавая минимальное переходное сопротивление в месте контакта; 2) оказывать минимальное механическое сопротивление движению всей установки по пропалываемому участку; 3) обеспечивать необходимый технологический эффект необратимого повреждения внутриклеточных компонентов тканей сорных растений при как можно меньшем рабочем напряжении установки; 4) не создавать электроопасных условий поражения электрическим током человека за зоной обработки сорняков.

Принципиально конструкция устройства для подведения электрических воздействий к сорным растениям представляет электродную систему, состоящую только из навесных электродов или навесных электродов, дополненных хотя бы одним электродом, заглубленным в почву. Выбор варианта подведения повреждающей дозы электрической энергии к сорным растениям должен производиться в соответствии с технологией возделывания культурных растений, местных почвенных и климатических условий, видов и периодов развития произрастающих сорняков, засоренности почвенных участков. Для навесных электродов обычно использовали токопроводящие гладкие электроды (штанги, бруски, металлические стержни) или, как хотелось бы рекомендовать, опираясь на изученные электропроводные свойства цепей обработки, электроды со сложным профилем поверхности контактирования, например, с подрезающими наружные поверхностные ткани кромками (рис. 2).

При применении заглубленных электродов необходимо организовать хороший электрический контакт с почвой, в которой расположены корни растений. При этом конструктивное исполнение электродов не должно создавать большого дополнительного сопротивления

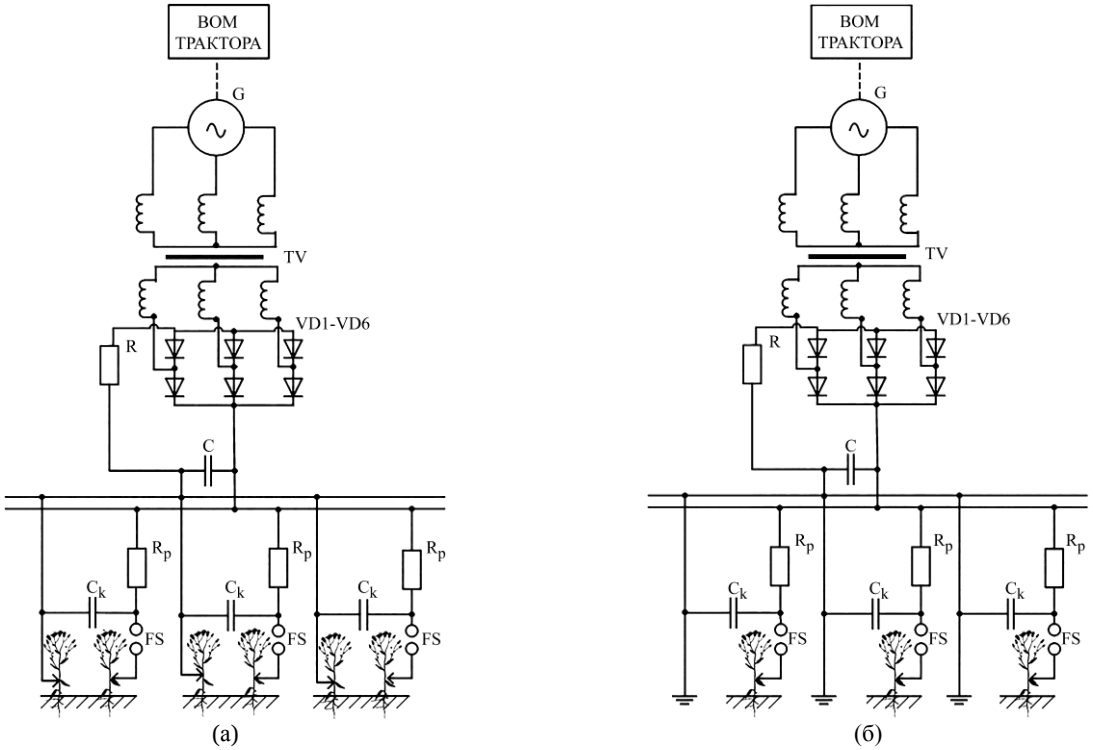


Рис. 3. Варианты принципиальных электрических схем агрегата: (а) – при использовании только навесных электродов; (б) – при использовании навесных и заглубленных в почву электродов. *G* – электрический генератор с приводом от ВОМ трактора; *TV* – повышающий до технологически обоснованного значения напряжения трансформатор; VD1-VD6 – блок выпрямления напряжения; *R* – токоограничивающее зарядное сопротивление; *C* – буферная накопительная емкость; R_p – электрическое сопротивление разрядного контура по секциям электродной системы; C_k – конденсатор разрядного контура по секциям электродной системы; *FS* – коммутирующий разрядник (показан простой вариант в виде тригатрона) выходного разрядного контура секции; блок управления коммутирующими разрядниками не показан.

перемещению агрегата по поверхности почвы. Для этих целей рекомендуется использовать модернизированные, с точки зрения электробезопасной эксплуатации, рабочие органы сельскохозяйственных машин (культиваторные лапы, ножи-щелеватели) или простые в конструктивном исполнении электроды, как, например, диски, черенковые ножи и т.п. Также следует иметь в виду, что при использовании только навесных электродов для эффективного уничтожения сорняков потребуется более высокое рабочее напряжение, что в некоторой мере усложняет блок питания агрегата. Во втором варианте напряжение необходимо несколько меньшего значения, но увеличатся затраты на подпочвенное перемещение электродов (на 5–10% в доле суммарных энергетических затрат).

Варианты построения принципиальных электрических схем агрегата и подведения электрической энергии к обрабатываемым сорным растениям показаны на рис. 3.

Для упрощения конструкции самого агрегата электроды можно разместить на промышленно выпускаемой и зачастую имеющейся в хозяйстве культиваторной раме, например, культиватора типа КРН-4,2 с опорными колесами и рабочими секциями без туковысевающих аппаратов и полольных рабочих органов

Структурную компоновку электродной системы рассмотрим на примере схемы, объясняющей ее построение для электрической прополки пропашных культур (рис. 4).

Устранить возможность шунтирования сорняков с различным сопротивлением друг другом, а также организовать обработку сорных растений, произрастающих в посевах пропашных культур, можно, применив конструкцию электродной системы, называемую секционированной и схематично показанную на рис. 4.

Все одиночные электроды, а точнее секции электродов, имеют одинаковую ширину захвата, например, по 22 см. При этом электроды, расположенные над междурядьями, перекрывают друг друга в горизонтальной плоскости на 2 см и снабжены полевыми делителями, поэтому могут приближаться к культурным растениям на расстояние до 2–4 см. При обработке пропашных культур рядковые электроды приподняты на высоту, превышающую «рост» культурных растений, что позволяет обрабатывать перерастающие культуры сорняки. Рядковые электроды должны подводить к сорному растению большую энергию импульсов, например за счет частоты следования импульсов, чем энергия импульсов на электродах междурядий, так как время контактирования сорняка с электродом в рядке значительно меньше, чем в междурядье.

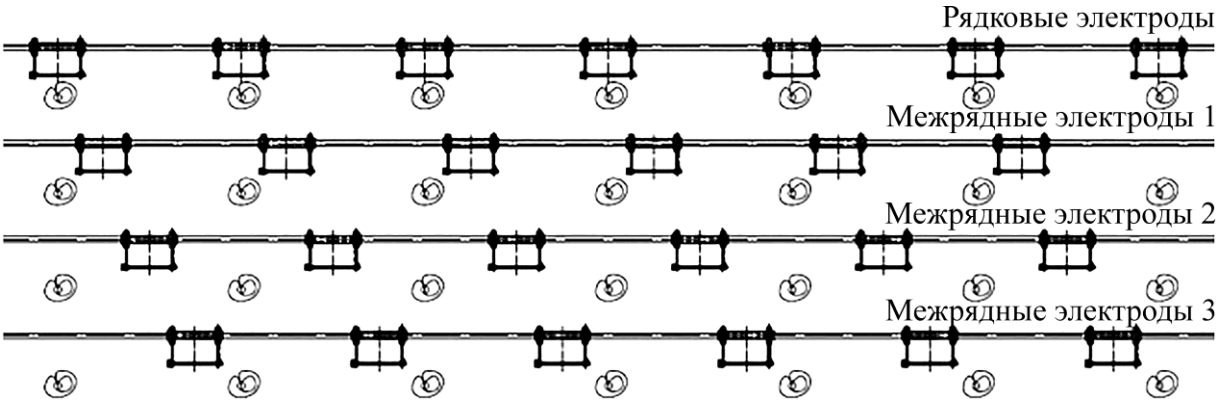


Рис. 4. Схема размещения электродных секций электротехнологической установки для борьбы с сорной и нежелательной растительностью электрическими импульсами высокого напряжения.

При обработке паров или еще не взошедших пропашных культур и рядковые электроды, и электроды междурядий находятся на одной высоте подвеса.

На рис. 4 видно, что на каждое междурядье приходится по три электрода, а на каждый посадочный рядок – один. Для облегчения обработки поля на крайний левый ряд устанавливается дополнительный электрод, что позволяет трактору делать следующий заход для обработки с того же края поля, на каком закончен предыдущий (трактор двигается челночно, а не постоянно возвращается на одну сторону поля).

Каждая электродная секция и соответствующий ей разрядный контур питаются от шины буферной емкости (рис. 3). Число же разрядных контуров, соединенных параллельно, определяется количеством электродных секций. Так как в одном из вариантов к реализации предлагается, например, подведение электрической энергии к растению по цепи протекания тока обработки: «навесной электрод–растение–почва–заглубленный электрод», то в этом случае все «отрицательные» выводы разрядных контуров должны быть соединены в общую шину и подключены к заземляющему электроду. Отрицательный потенциал на заземляющем электроде позволит его токопроводящему материалу (металлу) дольше сохраняться от негативного действия электрокоррозии, а также даст возможность уменьшить его сопротивление перемещению в почве из-за явления осмоса, так как почвенная влага при прохождении тока устремляется к отрицательному электроду, что улучшит его поверхностную «смазку». Положительные же выводы разрядных контуров, питающих секции, соединяются каждый со своей электродной секцией.

Уничтожение сорняков производится или между рядами культурных растений, или при отсутствии посевов и посадок по всему полю сплошной обработкой. В любом случае подведение энергии к растениям выполняется контактированием хотя бы одного электрода с их стеблями. Поэтому до обработки они не должны быть смяты колесами и, следовательно, электродная система должна располагаться в передней части трактора перед радиатором. Поскольку рабочее напряжение для электродной системы по техническим условиям составляет не менее 20–25 кВ, то с целью сокращения длины высоковольтных проводников повышающий трансформатор и генератор импульсов высокого напряжения следует размещать вблизи электродов (рис. 1).

Применение секционированной навесной электродной системы исключает возможность шунтирования сорных растений друг другом из-за различия сопротивления их тканей, а также способствует более стабильному характеру нагрузки, что позволяет увеличить ширину захвата установки приодинаковой мощности источника питания.

Засоренность почвенных площадей определяет значение мощности, подводимой к электродной системе, а, следовательно, и мощность источника электрической энергии (рис. 5а). На рис. 5б представлены зависимости мощности, подводимой к электродной системе, от ее ширины захвата.

Проанализировав полученные характеристики, можно заключить, что мощность, подводимая к электродной системе, соответствует значению 10,57 кВт при обработке почвенного массива, засоренного сорняками, в количестве 3 шт./м^2 при скорости перемещения агрегата 4,4 км/ч и ширине захвата 7,22 м; 17,55 кВт – при 6 шт./м^2; 23,24 кВт – при 9 шт./м^2; 27,69 кВт – при 12 шт./м^2; 31,38 кВт – при 15 шт./м^2.

Мощность, подводимая к электродной системе, не может превышать значений 6,29–34,77 кВт при обработке почвенного массива при средней засоренности, скорости перемещения 4,4 км/ч и ширине захвата от 0,92 до 7,22 м.

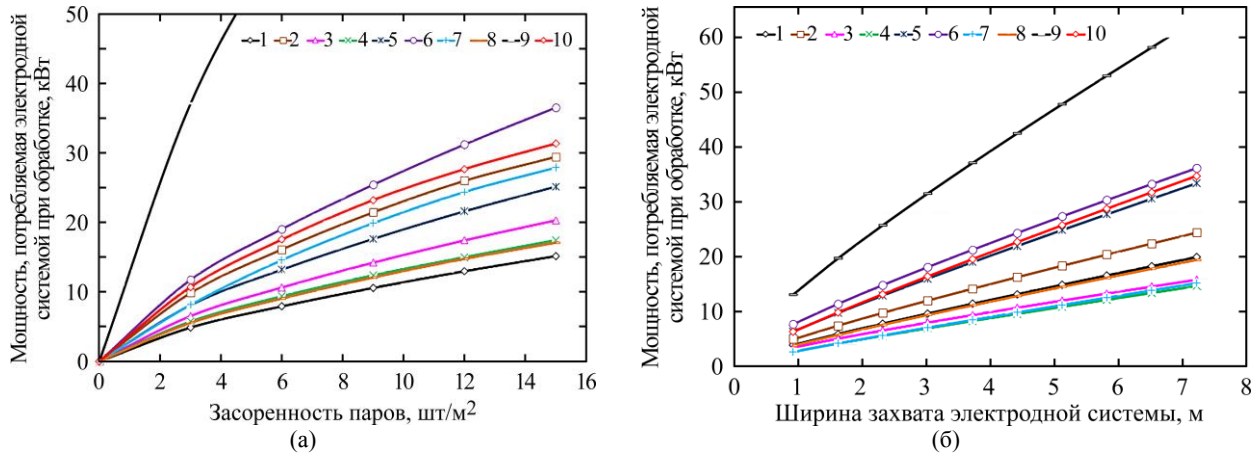


Рис. 5. Зависимость мощности, подводимой к электродной системе, от: (а) – засоренности обрабатываемой площади, на примере паров; (б) – ее ширины захвата. *1* – щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*); *2* – дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*); *3* – марь городская *(Oxybasis urbica L.)*; *4* – конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*); *5* – осот розовый (*Cirsium arvense L.*); *6* – осот полевой (*Sonchus arvensis L.*); *7* – вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*); *8* – молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*); *9* – молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*); *10* – среднестатистический сорняк.

Таблица. Основные технологические параметры процесса электроимпульсного уничтожения сорных растений и технические характеристики источника электрической энергии агрегата

Характеристики, параметры	Единицы измерения	Численные значения при уничтожении сорных растений:									
		щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus L.*)	дурнишник обыкновенный (*Xanthium strumarium L.*)	марь городская (*Oxybasis urbica L.*)	конопля сорнополевая (*Cannabis ruderalis L.*)	осот розовый (*Cirsium arvense L.*)	осот полевой (*Sonchus arvensis L.*)	вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*)	молокан татарский (*Lactuca tatarica L.*)	молочай лозный (*Euphorbia waldsteinii L.*)	среднестатистический сорняк
Летальная доза энергии	Дж	69	159	94,5	106	118	160	192	84	655	181,9
Число импульсов, прошедших через сорняк, за время контактирования		53	122	73	82	91	123	230	513	2096	685
Скважность импульсов		25,5	16,9	21,9	37,7	17,1	10,8	26,2	3,4	1,3	21,1
Мощность источника питания при ширине захвата b = 3,72 м	кВт	4,87	9,84	6,54	5,74	16,21	11,75	8,45	11,11	37,10	13,15
Мощность источника питания при ширине захвата b = 7,22 м	кВт	8,0	16,53	10,77	9,89	28,13	19,17	15,18	19,43	63,31	22,61
Расход электроэнергии на 1 га (≈ 100 000 сорняков)	кВт·ч	1,92	4,42	2,60	2,94	3,28	4,44	5,30	2,33	18,19	5,06

Определены основные оптимальные технологические параметры процесса электроимпульсного уничтожения сорных растений и технические характеристики источника электрической энергии при амплитуде напряжения обработки 20 кВ и энергии одного импульса 1,3 Дж (см. таблицу).

Для оценки практической реализации электроимпульсной прополки сорняков выполнен оценочный расчет совокупных энергетических затрат при возделывание озимой пшеницы (*Triticum aestivum L.*) сорта Мироновская юбилейная по черному пару на угодьях Волгоградской области. Для сравнения затрат вариантов борьбы с вызревшими, с физиологической точки зрения, сорными растениями выполнен расчет и сравнение энергоемкости электрокультивации с опрыскиванием гербицидами, а также с механической культивацией и боронованием почвы. Полученные

результаты свидетельствуют, что использование электропрополки во всех случаях позволяет снизить энергоемкость операции борьбы с сорной растительностью. При засоренности почвы однолетними сорняками эти показатели снижаются по сравнению с культивацией на 75,9%, а по сравнению с химической прополкой – на 87,0%, а в случае засоренности почвы многолетними сорными растениями – на 16,7% и 54,9%. Применение электрической прополки паров позволит снизить по сравнению с химической полные совокупные энергозатраты за весь технологический цикл выращивания озимой пшеницы на 2,6%, а по сравнению с культивацией – на 1,2%. В результате оценочного расчета совокупные затраты энергии на электроимпульсную обработку сорных растений составили 163,65–204,67 МДж/га, которые свидетельствуют о перспективности предлагаемого варианта борьбы с сорняками и не противоречат полученным результатам оценки, выполненной в европейских странах, а также в Северной и Южной Америке [16, 17, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования по изучению электрофизических свойств растительной ткани сорняков, электропроводных характеристик цепей протекания тока обработки, чувствительности растительной ткани сорных трав к электроимпульсному повреждающему воздействию и определению подводимых к растениям доз электрической энергии для уничтожения сорной и нежелательной растительности позволили обосновать структуру электротехнологической установки, агрегатируемой с универсальным колесным трактором, и оценить параметры ее электрической части.

Инженерно-конструкторские изыскания и анализ конструктивных особенностей позволил оценить мощностные характеристики ВОМ трактора и сочлененного с ним электрического генератора, обосновать особенности секций электродов и применимости варианта использования электродной системы в целом.

Анализ совокупных энергетических затрат при электроимпульсной обработке почвенных площадей от сорных и нежелательных растений и их оценка при возделывании озимой пшеницы (*Triticum aestivum L.*) сорта Мироновская юбилейная по черному пару на угодьях Волгоградской области позволили обоснованно считать такую обработку менее энергозатратной по сравнению с механичной культивацией и химической прополкой на площади 100 га, экологически безопасной и не противоречащей данным, полученным при реализации такого рода агроэлектротехнологий в европейских странах и на других континентах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завалин, А.А., Проблемы и пути решения технологического развития земледелия, *Земледелие*, 2024, № 2, с. 25.
   https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-2-25-29
2. Kumar, S., Meena, R.S., Sheoran, S., Jangir, C.K., et al., Remote sensing for agriculture and resource management, In *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (Jhariya, M.K., Meena, R.S., Banerjee, A., Meena, S.N., Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2022, p. 91.
   https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00012-0
3. Kubiak, A., Wolna-Maruwka, A., Niewiadomska, A. and Pilarska, A.A., The problem of weed infestation of agricultural plantations vs. the assumptions of the european biodiversity strategy, *Agronomy*, 2022, vol. 12, no. 8, art. ID 1808.
   https://doi.org/10.3390/agronomy12081808
4. Bilibio, C., Uteau, D., Horvat, M., Rosskopf, U., et al., Impact of ten years conservation tillage in organic farming on soil physical properties in a loess soil – Northern Hesse, Germany, *Agriculture*, 2023, vol. 13, art. ID 133.
   https://doi.org/10.3390/agriculture13010133
5. Stankowski, S., Jaroszewska, A., Osińska, B., Tomaszewicz, et al., Analysis of long-term effect of tillage systems and pre-crop on physicochemical properties and chemical composition of soil, *Agronomy*, 2022, vol. 12, art. ID 2072.
   https://doi.org/10.3390/agronomy12092072
6. Negrete-Rodríguez, M.d.l.L.X., Conde-Barajas, E., Silva-Martínez, G.A., Acosta-Garcia, G., et al., Tillage and its effect on agricultural soils: A quality index approach, *Agronomy*, 2024, vol. 14, no. 12, art. ID 2793.
   https://doi.org/10.3390/agronomy14122793
7. Beckie, H., Flower, K. and Ashworth, M., Farming without glyphosate? *Plants*, 2020, vol. 9, no. 1, p. 96.
   https://doi.org/10.3390/plants9010096
8. Tuesca, D., Puricelli, E. and Papa, J.C., A long-term study of weed flora shifts in different tillage systems, *Weed Res.*, 2001, vol. 41, p. 369.
9. Baessler, C. and Klotz, S., Effects of changes in agricultural land-use on landscape structure and arable weed vegetation over the last 50 years, *Agricult., Ecosyst. Envir.*, 2006, vol. 115, p. 43.
10. *Herbicide Resistance in Weeds and Crops*, Pacanoski Z. (ed.). Rijeka (Croatia): InTech, 2017. 186 p.
    https://doi.org/10.5772/65569

11. Сенатор, С.А., Виноградова, Ю.К., Инвазионные растения России: результаты инвентаризации, особенности распространения и вопросы управления, *Успехи современной биологии*, 2023, т. 143, № 4, с. 393.

https://doi.org/10.31857/S0042132423040099

12. Stankovic, M.V., Cvijanovic, M. and Dukic, V., Ecological importance of electrical devices innovative in the process of anti *Ambrosia artemisiifolia* L., *Econ. Agric.*, 2016, vol. 63, no 3, p. 861.

13. Клочков, А.В., Механические и физические методы борьбы с сорняками, *Наше сельское хозяйство*, 2020, № 17(241), с. 84.

14. Юдаев, И.В., Технологически эффективная и экологически безопасная борьба с сорными растениями, *Сельский механизатор*, 2020, № 8, с. 2.

15. Lehnhoff, E.A., Neher, P., Indacochea, A. and Beck, L., Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas, *Weed Res.*, 2022, vol. 62, p. 149.

https://doi.org/10.1111/wre.12523

16. Slaven, M.J., Koch, M. and Borger, C.P.D., Exploring the potential of electric weed control: a review, *Weed Sci.*, 2023, vol. 71, p. 403.

https://doi.org/10.1017/wsc.2023.38

17. Merfield, C.N., A comprehensive guide to electrical weed management, *The BHU Future Farming Centre Bulletin*, 2024(1), vol. 64.

https://www.bhu.org.nz/future-farmingcentre/information/bulletin/2024-v1/

18. Hirsh, R.F., *Powering American Farms: The Overlooked Origins of Rural Electrification.* Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press, 2022, p. 164.

19. Diprose, M.F., Hackam, R. and Benson, F.S., Weed control by high voltage electric shocks. In: *Brighton Crop Protection Conference–Weeds*. Brighton, UK: British Crop Protection Council, 1978, p. 443.

20. Diprose, M.F. and Benson, F.A., Electrical methods of killing plants, *J. Agricult. Eng. Res.*, 1984, vol. 30, p. 197.

21. Kaufman, K.R. and Schaffner, L.W., Energy and economics of electrical weed control, *Trans ASAE*, 1982, vol. 25, p. 297.

22. Тверитин, А.В., Трофимова Н.Б., Уничтожение сорняков током высокого напряжения, *ЭОМ*, 1986, № 3, с. 52.

23. Vigneault, C., Benoit, D.L. and McLaughlin, N.B., Energy aspects of weed Electrocution, *Review of Weed Science*, 1990, vol. 5, p. 15–26.

24. Vigneault, C. and Benoit, D., Electrical weed control: theory and applications, In: *Physical Control Methods in Plant Protection* (Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-Lessard, F., Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, p. 174.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-04584-8_12

25. Koch, M., Hermann, A., Ergas, B. and Risser, P., Möglichkeiten eines elektrophysikalischen Verfahrens zur Sikkation in Frühkartoffeln und Bekämpfung von ausdauernden Unkräutern [The Electroherb™ technology – a new technique supporting modern weed management], In: *Proc. 29th German Workshop on Questions of Weed Biology and Control/Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und –bekämpfung.* Braunschweig, Germany: Julius Kühn Institute, 2020. p. 261.

https://doi.org/10.5073/jka.2020.464.039.

26. Bloomer, D.J., Harrington, K.C., Ghanizadeh, H. and James, T.K., Micro electric shocks control broadleaved and grass weeds, *Agronomy*, 2022, vol. 12, no. 9, art. ID 2039.

https://doi.org/10.3390/agronomy12092039

27. Baatarkhuu, D., Tuvshinjargal, D., Jargalsaihan, A. and Lee, H.-K., Destruction of weeds using HV pulsed discharges, *J. Multidiscipl. Eng. Sci. Stud.*, 2018, vol. 4, no. 11, p. 2277.

28. Chandler, J.M., Crops and weed response to electrical discharge, In: *Proc. 31st Annual Meeting of the Southern Weed Science Society.* New Orleans, LA: Southern Weed Science Society, 1978, p. 63.

29. Vigoureux, A., Results of trials carried out in Belgium in 1980 about killing weed beets by electric discharge, *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit Gent*, 1981, vol. 46, p. 163.

30. Баев, В.И., Бородин, И.Ф., *Электроимпульсная предуборочная обработка растений подсолнечника и табака*. Волгоград: Станица-2, 2002. 230 с.

31. Baev, V.I. and Yudaev, I.V., Efficiency estimation of type of the electrical exposure on plants at their processing, *Ad Alta*, 2018, vol. 8, no. 1, p. 252.

32. Yudaev, I., Daus, Y., Kokurin, R., Prokofyev, P., et al., Electro-impulse irreversible plant tissue damage as highly efficient agricultural technology. In: *Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development* (Kharchenko, V., Vasant, P., Eds.). Hershey, PA: IGI Global Sci. Publ., 2019, p. 396.

https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7573-3.ch015

33. Yudaev, I.V., Analysis of variation in circuit parameters for substitute on of weed plant tissue under electric impulse action, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 2, p. 219.

https://doi.org/10.3103/S1068375519020157

34. Юдаев, И.В., Даус, Ю.В., Электропроводные свойства сорных растений – объектов высоковольтного импульсного воздействия, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 2, с. 41.

https://doi.org/10.5281/zenodo.3747843

35. Юдаев, И.В., Баев, В.И., Бренина, Т.П., Елисеев, Д.С., *Сорные растения как объект электрической прополки: биологические особенности и электрофизические свойства*. Волгоград: Станица-2, 2004. 128 с.

36. Yudaev, I.V. and Daus, Yu.V., Characteristics of changes in the electrical conductivity properties of

weed plant tissues under electropulse damage, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, no. 3, p. 329. https://doi.org/10.3103/s1068375523030171

37. Judaev, I.V. and Brenina, T.P., The definition of electro impulses used in weed control, *J. Agricult. Sci.* (Belgrade), 2008, vol. 53. no. 1, p. 37. https://doi.org/10.2298/JAS0801037J

38. Yudaev, I., Daus, Y., Panchenko, V. and Bolshev, V., Influence of factors determining weeds' plant tissue reaction to the electric pulse damage impact, *Agriculture*, 2023, vol. 13, art. ID 1099. https://doi.org/10.3390/agriculture13051099

39. Юдаев, И.В., Бренина, Т.П., Кривощапов, В.А., Энергетические характеристики ВОМ при агрегатировании трактора с устройством для электроимпульсной прополки, *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, 2008, № 7, с. 49.

Summary

The current state of agricultural land makes us think about the need to search for new, innovative methods of weed control since relying only on intensive chemical and historically justified mechanical processing of soil areas is not always justified today, due to the fact that nature is cumulatively inflicted with environmental damage and humus, and organic matter reserves in the soil continue to be uncontrollably depleted. It is proposed to use electric pulse weeding as a technologically and ecologically justified alternative to traditional methods. The conducted studies on the electrical conductivity of the weed plant tissue and processing current flow circuits, identifying the option of supplying electrical energy and damaging doses of energy, made it possible to justify the structure of the unit, consisting of a mover (wheeled tractor) and an electro-technological unit, as well as to evaluate the economic and agro-technological efficiency of its use in agricultural technologies. In principle, the unit consists of three main structural blocks: a movement power unit (a universal row-crop wheeled tractor), a power source and an electrode system. In order to achieve lower cost of the device and greater maneuverability of the unit, it is preferable to choose the option with a trailer generating unit and mounted units for increasing voltage, forming pulses and an electrode system. Analysis of the total energy costs during the electric pulse treatment of soil areas from weeds and unwanted plants, and their assessment during cultivation of winter wheat of the Mironovskaya Yubileynaya variety on the black fallow on the lands of the Volgograd region made it possible to reasonably consider such treatment to be less energy-intensive compared to mechanical cultivation and chemical weeding on an area of 100 hectares, and also implemented with a minimal negative impact on the environment.

Keywords: weed control, electric pulse weeding, technological efficiency, environmental safety, structure of an electric pulse weeder, parameters and characteristics of the process