

# Анализ изменения параметров схемы замещения растительной ткани сорного растения при электроимпульсном воздействии

И. В. Юдаев

Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»,  
г. Зерноград, Ростовская обл., 347740, Россия, e-mail: [etsh1965@mail.ru](mailto:etsh1965@mail.ru)

Показано, что для обоснования количественных показателей процесса электроимпульсного уничтожения сорняков, а также выяснения механизма повреждения и последовательности протекающих при этом нарушений во внутренней структуре обрабатываемых растений необходимо знать не только построение электрической схемы замещения растительной ткани, но и располагать информацией о характере изменения параметров элементов этой схемы в процессе электроповреждения. Представленная методика позволяет недорогими и доступными техническими средствами проконтролировать повреждение тканей сорных растений и, используя разработанный математический аппарат, рассчитать количественные показатели. Анализ показывает, что процесс повреждения растительных тканей сорняков характеризуется, прежде всего, потерей клеточными мембранами своих полупроницаемых функций и увеличением активной проводимости обрабатываемых участков растений. Такие изменения внутренней организации растительных тканей приводят к потере жизнеспособности клеток на участках, подвергшихся электроимпульсной обработке. Представленный анализ укладывается в имеющееся представление ученых-биофизиков об электрическом повреждении внутренней структуры биологических объектов. Проводимые технологические исследования процесса электроимпульсного необратимого повреждения растительных тканей, опираясь на представленный в статье анализ, позволяют ограничивать подводимую для этого электрическую энергию, что определяет возможность реализовывать электроимпульсную прополку как энергосберегающий способ борьбы с сорной растительностью.

*Ключевые слова:* электроимпульсная прополка, необратимое электроповреждение растительной ткани, электрическая схема замещения растительной ткани сорняков, изменение параметров схемы замещения.

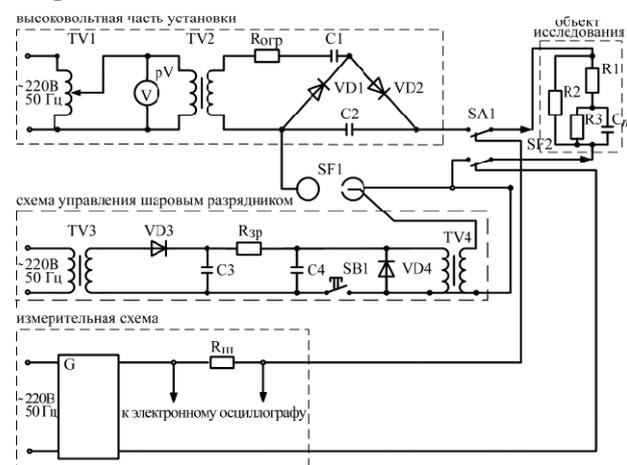
УДК 631.171+58.037+58.088

DOI: 10.5281/zenodo.1228838

Борьба с сорняками – серьезная проблема современного земледелия, для решения которой применяют разнообразные способы. Традиционный механический при высокой эффективности (до 70–95%) и многолетнем использовании подручных и серийно выпускаемых технических средств отличается существенной энергоемкостью. Химический способ характеризуется прежде всего избирательностью действия и еще более высокой эффективностью (до 100%), но он дорог, а главное – экологически не безопасен. В России, США, Франции и других странах разрабатываются различные эффективные и экологически чистые способы, среди которых одним из перспективных, с точки зрения снижения совокупных энергетических затрат и повышения экологической безопасности, является уничтожение нежелательной и особенно трудноискоренимой сорной растительности с помощью электрической энергии [1–3], а именно импульсов высокого напряжения [4–6].

Анализ процессов, протекающих в тканях сорняков при электроимпульсном воздействии, приводящем к серьезному повреждению внутренней структуры и последующей гибели расте-

ния, невозможно провести, располагая информацией лишь о построении эквивалентной электрической схемы замещения растительной ткани [7–11]. Поэтому необходимо также иметь представление о количественных показателях электрических компонентов этой схемы и их изменении в процессе электроимпульсного повреждения.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для осциллографирования тока, протекающего по растительной ткани сорняков при электроимпульсном воздействии.

Наиболее признанной сегодня считается схема замещения растительной ткани, вытекающая из ее клеточного строения (см. рис. 1 – объект исследования). Эта модель представляет собой принципиальную электрическую схему, включающую в себя параллельное соединение резистора  $R_2$ , соответствующего активному сопротивлению межклетника, и ветви, содержащей последовательное соединение активного сопротивления протоплазмы  $R_1$  со сложным соединением электрических компонентов мембраны – параллельно включенными емкостью  $C_m$  и активным сопротивлением  $R_3$ .

Сложность вычисления значений компонентов схемы замещения ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_m$ ) заключается в отсутствие возможности их точного расчета по результатам экспериментальных исследований. Это связано с тем, что электрический аналог такой схемы в теоретической электротехнике относится к группе двухполюсников, у которых известны внутренняя конфигурация элементов, вид и параметры входных и выходных сигналов, но для которых невозможно однозначно точно рассчитать значения параметров элементов, составляющих эту схему. При таком подходе проблематично получить лишь одно решение, которое бы соответствовало физической сути протекающих в растительных тканях процессов и не выходило бы за количественные рамки, установленные экспериментально. В то же время одним из наиболее часто применяемых и считающихся достоверными способов определения параметров элементов схемы замещения ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_m$ ) является метод анализа и расчета переходного процесса, протекающего в схеме замещения растительной ткани при подаче сигнала низкого напряжения прямоугольной формы [12, 13, 14, 15].

Цель работы – представление результатов проведенных исследований по изучению электроимпульсного необратимого повреждения растительной ткани сорных растений и анализа количественного изменения параметров компонентов электрической схемы ее замещения.

## МЕТОДИКА И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В проведенных экспериментальных исследованиях изучались электропроводные свойства сорных растений, произрастающих на сельскохозяйственных угодьях Нижнего Поволжья. Сорняки извлекались из почвы в местах их естественного произрастания и пересаживались в вегетационные сосуды. На первоначальном этапе исследования проводились эксперименты с целыми растениями, при этом электрические воздействия подводились с помощью накладных электродов. Накладные неполяризующиеся

электроды создавали трудности при высоковольтном исследовании и дополнительные помехи, которые накладывались на осциллограммы измерительного тока. Так как технология электроимпульсного уничтожения сорных растений [6] предполагает механическое повреждение наружного слоя (эпидермиса) сорняков и последующий непосредственный контакт с внутренними структурами растения, поэтому было принято решение использовать фрагменты стеблевой части и корневой системы различных сорняков, которые вырезались с помощью хирургического скальпеля из целого растения и помещались в измерительную камеру между неполяризующимися иммерсионными электродами. Такая замена не повлияла ни на осциллограмму измерительного тока, ни на изучение процесса необратимого электроимпульсного повреждения обрабатываемого участка сорного растения.

Прямоугольные измерительные импульсы напряжения с выхода типового генератора импульсов  $G$  через шунт  $R_{ш}$  подавались на закрепленный в межэлектродном промежутке исследуемый образец растительной ткани (см. рис. 1). Начальная амплитуда измерительных импульсов напряжения, прикладываемых к живой растительной ткани, выбиралась такой, чтобы плотность тока, протекающего по биологическому объекту, не повреждала и не травмировала внутренние ткани растения [14]. Для удобства последующей математической обработки кривые тока и напряжения фотографировали.

Экспериментальная установка для высоковольтной электроимпульсной обработки получала питание от сети однофазного переменного напряжения, необходимое значение которого на зажимах схемы устанавливалось с помощью лабораторного автотрансформатора (ТВ1). Для визуального контроля значений напряжения обработки использовали вольтметр  $pV$ , включенный в первичную обмотку высоковольтного трансформатора и проградуированный в киловольтах. Повышающий трансформатор ТВ2 увеличивал значение переменного напряжения до 1–6 кВ (в зависимости от поставленных задач исследования), после чего переменное напряжение выпрямлялось и удваивалось с помощью схемы умножения VD1-C1, VD2-C2. Для ограничения зарядного тока использовали резистор  $R_{огр}$ .

Накопительными емкостями генератора импульсных напряжений (ГИН) являлись конденсаторы второго каскада умножения. Для получения различных значений электрической энергии, необходимой для обработки образцов сорных растений, емкость батареи конденсато-

ров варьировали за счет переключения их соединения от 100 до 2200 пФ. Для управления моментом разряда конденсатора ГИН, а также для подсчета числа импульсов, воздействующих на растительную ткань, использовали управляемый шаровой искровой разрядник (тригatron). Момент подачи пускового импульса соответствовал окончанию времени зарядки конденсаторов ГИН.

Гальваническая развязка между разрядным контуром ГИН и измерительной схемой выполнена с использованием трехпозиционного переключателя SA1. Разрядная камера, внутри которой размещались электроды, создавала затенение, что позволяло визуально следить за тем, не происходит ли перекрытие искрового разряда по поверхности растительного образца. Это было необходимо, так как технологическая эффективность уничтожения сорных растений зависит прежде всего от плотности тока, протекающего через растительную ткань, а не от разряда по поверхности [12, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Переходные процессы в растительной ткани моделировались с использованием известного из курса теоретической электротехники операторного метода расчета электрических цепей.

Так как полное сопротивление растительной ткани носит активно-емкостный характер, то форма сигнала измерительного тока будет отражать собой процесс зарядки-разрядки емкости клеточной мембраны (рис. 2) при подаче на растительный образец однополярных импульсов напряжения прямоугольной формы. Считая, что за время существования прямоугольного импульса напряжения все элементы схемы замещения постоянны, а длительность фронта импульса напряжения близка к нулю, легко установить аналитическое выражение для тока схемы:

$$i(t) = i_{cv}(t) + i_{np}(t) = \frac{U \cdot (R_1 + R_2) \cdot e^{pt}}{R_{uu} \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} + \frac{U \cdot (R_1 + R_2 + R_3)}{R_{uu} \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_2 \cdot (R_1 + R_3)} \times \left[ 1 - \frac{1}{C_m \cdot R_3 \cdot (R_{uu} \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2)} \cdot e^{pt} \right], \quad (1)$$

где

$$p = -\frac{1}{\tau} = -\frac{R_{uu} \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_2 \cdot (R_1 + R_2)}{C_m \cdot R_3 \cdot (R_{uu} \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2)}. \quad (2)$$

В качестве примера, используя полученные аналитические выражения совместно с имеющимися результатами экспериментальных исследований электропроводных свойств растительной

ткани стебля щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus L.*), рассмотрим определение численных значений параметров элементов эквивалентной электрической схемы замещения. Для выяснения сущности и обоснования процесса уничтожения сорняков проанализируем изменение параметров элементов схемы замещения растительной ткани в процессе электроимпульсного воздействия на растения.

Для определения значений параметров элементов схемы замещения воспользуемся выражением (1) и решениями уравнения (2) для моментов времени  $t = 0$  и  $t = \infty$ . Из [9, 12, 13, 15] известно, что для живой ткани  $R_3 \gg R_2$ ;  $R_2 \gg R_1$  и  $C_m \approx 10^{-9} - 10^{-12}$  Ф. Учитывая это, принимаем допущения, что  $(R_1 + R_2 + R_3) \approx R_3$ ;  $(R_1 + R_3) \approx R_3$ ;  $(R_1 + R_2) \approx R_2$  и т.п., тогда выражения (1) и (2) существенно упростятся, в результате чего параметры элементов схемы замещения можно определить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &\approx \frac{U}{i_{cv}} - R_{uu}; R_2 \approx \frac{U}{i_{np}} - R_{uu}; \\ R_3 &\approx \frac{U \cdot (R_1 + R_2) - i_{np} \cdot (R_{uu} \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2)}{U - i_{np} \cdot R_2}; \\ C_m &\approx \frac{\tau \cdot (R_{uu} + R_2)}{R_{uu} \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

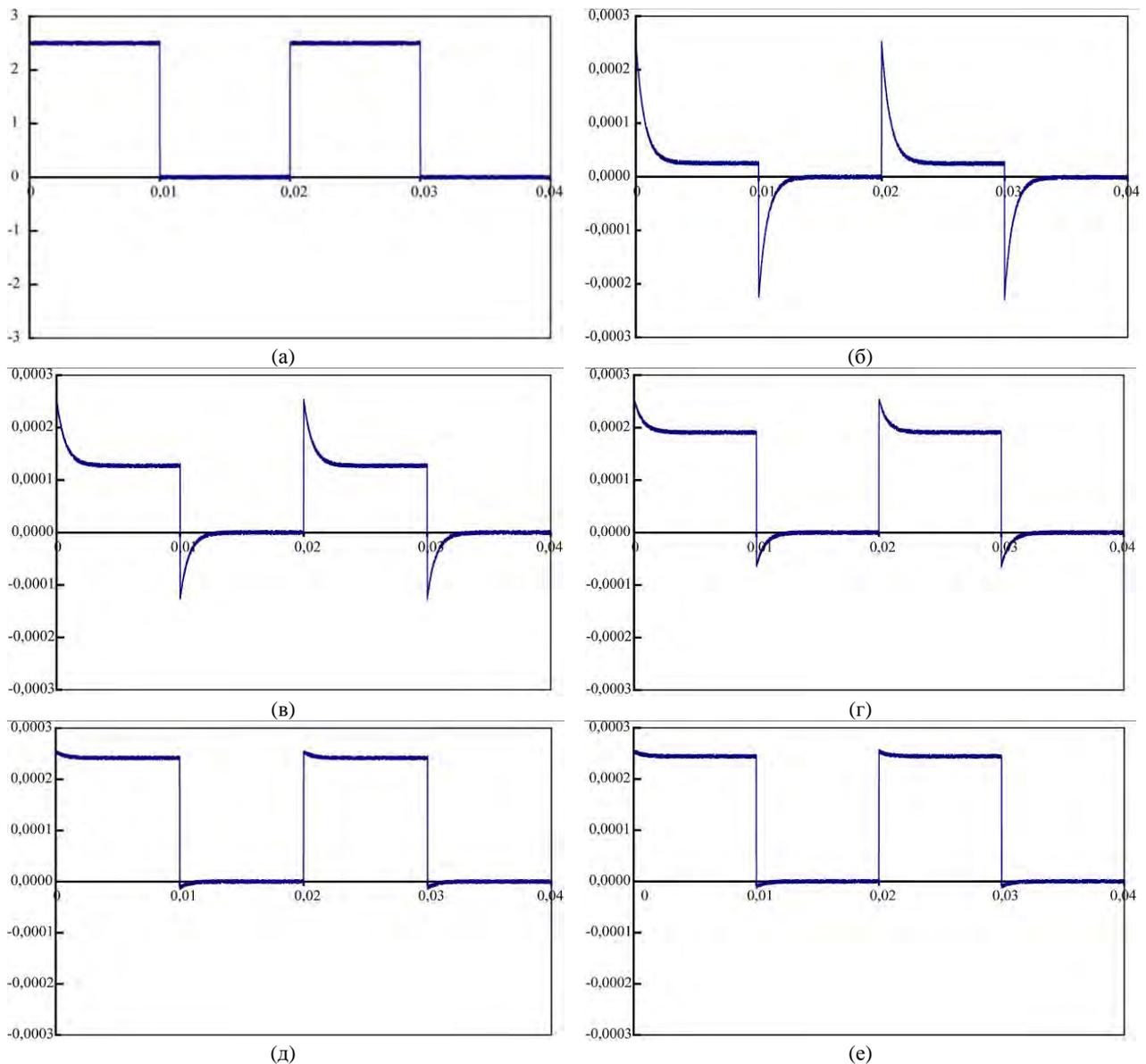
Сравнение результатов расчетов параметров элементов электрической модели растительной ткани по формулам (3) и полученной с применением компьютерного моделирования показывает, что погрешность не превышает 10–20%.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов измерительного напряжения (рис. 2а) и тока для неповрежденной растительной ткани стебля щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus L.*), находящейся в фазе плодоношения (рис. 2б) и этого же сигнала в процессе электрического повреждения этой же ткани (рис. 2в–е).

На наш взгляд, процесс повреждения растительной ткани и изменение параметров ее схемы замещения могут протекать следующим образом.

При подаче на живую растительную ткань прямоугольного импульса напряжения (рис. 2а) осциллограмма протекающего через нее тока представляет собой круто падающую экспоненту, что обусловлено зарядкой мембранной емкости  $C_m$ . Максимальное значение тока почти в 4 раза больше, чем в момент окончания переходного процесса (рис. 2б), характеризующегося завершением зарядки емкости  $C_m$ .

После частичного повреждения электрическим током у растительной ткани в первую очередь уменьшается активное сопротивление клеточных мембран  $R_3$  за счет потери ими полупроницаемых свойств. Это обстоятельство



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока, протекающего через неповрежденную растительную ткань стебля щирицы запрокинутой (б), а также при воздействии электрических импульсов (в, г, д, е).

приводит к возникновению шунтирования емкости мембраны  $C_m$  уменьшившимся активным сопротивлением  $R_3$ , что влечет за собой потерю мембраной емкостных свойств. Выходящий через открывшиеся в стенке клетки поры мембраны сок протоплазмы увеличивает проводимость межклетника. Теперь осциллограмма измерительного тока через растительную ткань от приложенного измерительного прямоугольного импульса напряжения представляет собой уже слабо падающую экспоненту. Наибольшее значение тока за счет уменьшения активного сопротивления межклеточника  $R_2$  и мембраны  $R_3$  возрастет всего лишь в 1,14 раза от первоначального (до повреждения) значения, а установившееся его значение за то же время – в 3,29 раза (рис. 2в). Отношение же максимального значения к установившемуся уменьшится и составит 1,39. При последующем воздействии на растительный образец импульсами высокого

напряжения количественные показатели осциллограмм тока (рис. 2г–д) свидетельствуют об уменьшении общего активного сопротивления схемы замещения до значения сопротивления протоплазмы  $R_1$  и окончательной потере полупроницаемых свойств клеточными мембранами. При полном повреждении растительной ткани значения активного сопротивления мембраны  $R_3$  и протоплазмы  $R_1$  практически сравняются, емкостные свойства мембран почти полностью исчезнут, а вид осциллограммы тока через ткань станет близким к виду осциллограммы измерительного прямоугольного импульса напряжения со слабо выраженной экспоненциальной зависимостью ее крыши (рис. 2е). Отношение максимального значения тока к установившемуся составит 1,05, что можно объяснить отсутствием в схеме замещения емкостного элемента  $C_m$ .

Для неповрежденной растительной ткани стебля щирицы запрокинутой (*Amaranthus*

Значения параметров схемы замещения растительной ткани стебля щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) при воздействии на нее электрическими импульсами высокого напряжения

Число воздействующих импульсов	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$C_m$ , пФ
$m = 0$	15595,24	92380,95	853423,81	165,93
$m = 1$	12395,83	21159,42	44772,11	380,48
$m = 2$	9907,41	13626,37	18567,79	523,13
$m = 3$	9545,45	12164,95	14798,59	598,65
$m = 4$	9026,55	11078,43	12273,16	686,16
$m = 5$	8695,65	9907,41	9299,06	746,03
$m = 6$	7916,67	8859,65	7849,29	840,14

*retroflexus* L.) значения параметров схемы замещения, рассчитанные по формулам (3), равны:  $R_1 = 15,59$  кОм;  $R_2 = 92,38$  кОм;  $R_3 = 853,42$  кОм;  $C_m = 165,91$  пФ. Осциллограмма измерительного тока, протекающего по этому фрагменту, приведена на рис. 2б.

На фрагмент растительной ткани стебля длиной 20,4 мм и эквивалентным диаметром 1,95 мм оказывалось воздействие электрическими импульсами напряжения амплитудой  $U = 3$  кВ, накопительная емкость разрядного контура бралась равной  $C = 100$  пФ и в одном импульсе прикладывалась энергия, удельное значение которой равнялось  $W_{1уд} = 7,32 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup>.

Количественно оценить изменение параметров элементов схемы замещения при повреждении растительной ткани можно, рассчитав их значения по выражениям (3), а исходные для расчета данные взять из осциллограмм (рис. 2в–е). Результаты расчетов представлены в таблице.

Проведенные исследования позволяют констатировать, что характер повреждения стеблевой и корневой ткани сорных растений различных биологических групп одинаков. При этом можно говорить и о том, что изменение параметров элементов схемы замещения также одинаково – различия наблюдаются только в количественных значениях этих параметров схемы замещения.

Для подтверждения сказанного отметим, что в день проведения исследований, кроме растений щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.), изучались отдельные участки таких сорных растений, как осот розовый (*Cirsium arvense* L.) и осот полевой (*Sonchus arvensis* L.). Значения параметров схемы замещения для неповрежденной растительной ткани стебля осота розового:  $R_1 = 1,38$  кОм;  $R_2 = 24,7$  кОм;  $R_3 = 132,5$  кОм;  $C_m = 296,9$  пФ; для растительной ткани стебля осота полевого –

$R_1 = 1,7$  кОм;  $R_2 = 16,9$  кОм;  $R_3 = 89,3$  кОм;  $C_m = 270,6$  пФ; для неповрежденной растительной ткани корня осота розового:  $R_1 = 17,6$  кОм;  $R_2 = 89,5$  кОм;  $R_3 = 624,8$  кОм;  $C_m = 183,6$  пФ. При этом следует отметить, что количественный разброс характерен при изучении электрофизических свойств разнообразных биологических тканей [12–14]. На наш взгляд, это как раз характеризует влияние на электрическое сопротивление растительных тканей таких факторов, как фаза развития сорного растения, почвенно-климатические условия региона и места произрастания, рассматриваемое время года и другие внешние условия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер изменения значений параметров активных элементов схемы замещения растительной ткани сорняков  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  соответствует приведенному выше поведению этих сопротивлений при электрическом повреждении. Изменение же мембранной емкости  $C_m$  не полностью укладывается в ранее рассмотренное обоснование. Сделаем попытку уточнить, как происходит повреждение растительной ткани при электрическом воздействии на нее высокого напряжения, используя для этого схему замещения, осциллограммы тока при повреждении, а также характер изменения рассчитанных параметров схемы замещения.

При электрическом воздействии высоким импульсным напряжением на растительную ткань происходит увеличение мембранной разницы потенциалов (напряжения), что приводит к самопроизвольному спонтанному образованию мембранных пор увеличенных размеров (больше возможного критического радиуса). Это обстоятельство и увеличение числа пор связаны с тем, что они не могут сразу же затягиваться («залечиваться»), оставляя мембрану целой, то есть неповрежденной [16–19]. Внутриклеточный

раствор через открывшиеся поры с большим диаметром смешивается с содержимым межклеточника, в результате чего происходит постепенное выравнивание сопротивления межклеточной жидкости  $R_2$  и протоплазмы  $R_1$ . При этом за счет смешивания растворов, содержащихся в клетке и межклеточном пространстве, сопротивление  $R_2$  уменьшается до значения  $R_1$ . Небольшое уменьшение сопротивления  $R_1$  можно объяснить тем, что клеточный сок имеет более кислую реакцию, чем межклеточный раствор, поэтому, попадая в межклеточник, он вызывает денатурацию белков и инактивацию ферментов, что приводит к высвобождению воды и увеличению электрической проводимости полученной смеси. Уменьшение сопротивления мембраны  $R_3$  происходит из-за того, что все открывшиеся поры в мембранной оболочке заполняются полученным раствором с достаточно высокой электропроводностью.

Незначительное увеличение мембранной емкости  $C_m$  определяется ростом постоянной времени процесса, что отчетливо видно на рис. 2б–е, но одновременно с этим ранее отмечено уменьшение этой емкости. Анализируя с точки зрения теоретической электротехники схему замещения растительной ткани, можно заметить, что исключить емкость  $C_m$  можно, не только убрав ее из схемы, но и зашунтировав ее небольшим по значению активным сопротивлением  $R_3$ . Такая гипотеза подтверждается тем, что при электрическом повреждении сопротивление мембраны существенно уменьшается за счет увеличения числа пор в стенках мембран клеток растений. Незначительное же увеличение емкости мембраны  $C_m$  не противоречит исследованиям биофизиков. Ю.А. Чизмаджев с сотрудниками [15, 19] приводит формулу расчета изменения электрической емкости мембраны при появлении в ней структурного дефекта (поры), которая показывает, что она зависит от емкости единицы площади мембраны, умноженной на коэффициент  $\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_m} - 1\right)$ , расчетное значение которого больше единицы:

$$\Delta C = \pi \cdot r^2 \cdot C_0 \cdot \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_m} - 1\right), \quad (4)$$

где  $\epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость воды,  $\epsilon_s = 80$ ;  $\epsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость липидов мембраны,  $\epsilon_m = 2-3$ ;  $C_0$  – емкость единицы площади мембраны;  $r$  – радиус поры.

Предложенные варианты анализа протекающих в растении процессов при повреждении растительной ткани и оценки изменения параметров элементов ее схемы замещения при повреждении электрическим током могут

рассматриваться как рабочая гипотеза, которая позволяет с высокой степенью достоверности описать характер изменений в тканях при электроимпульсном необратимом повреждении.

В качестве одной из практических перспектив применения представленного анализа может рассматриваться вариант ограничения подачи электрической энергии на обрабатываемые растения после получения информации о нарушении целостности клеточных мембран, что позволит уменьшить затраты электроэнергии на сам процесс электроимпульсной прополки и тем самым сделать его более ресурсо- и энергосберегающим.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. *Electrical weed control: Theory and applications, in Physical control methods in plant protection*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 321 p.
2. Stankovic M., Cvijanovic M., Dukic V. *Economics of Agriculture*. 2016, **3**, 861–870.
3. Jabran Kh., Chauhan B.S. *Non-Chemical Weed Control*. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2018. 157 p.
4. Баев В.И., Юдаев И.В., Баев И.В. *Энергетика и автоматика*. 2013, **3**, 31–38.
5. Топорков В.Н., Королев В.А. *Электроимпульсная установка для борьбы с сорняками*. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2017. 132 с.
6. Baev V.I., Yudaev I.V. *Indian J Sci Technol*. 2017, **10**(1), 1–5. DOI:10.17485/ijst/2017/v10i1/109974.
7. Cao Y., Repo T., Silvennoinen R., Lehto T., Pelkonen P. *J Exp Bot*. 2010, **61**(9), 2491–2497. DOI:10.1093/jxb/erq078.
8. Ando Y., Mizutani K., Wakatsuki N. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering. IPCBEE*. IACSIT Press, Singapore, 2013, **50**, 39–44. DOI: 10.7763/IPCBEE.
9. Попова Н.А., Папченко А.Я., Болога М.К. *ЭОМ*. 2014, **50**(6), 83–91.
10. Hernández-Balaguera E., López-Dolado E., Polo J.L. *RSC Advances*. 2016, **6**, 22312–22319. DOI: 10.1039/C5RA24535D
11. Zhang M.I.N., Stout D.G., Willison J.H.M. *J Exp Bot*. 1990, **41**, 371–380.
12. Баев В.И., Бородин И.Ф. *Электроимпульсная предуборочная обработка растений подсолнечника и табака*. Волгоград: Станица-2, 2002. 230 с.
13. 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.
14. Volkov A.G. *Plant Electrophysiology: Theory and Methods*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 208 p.

15. Рубин А.Б. *Биофизика. Том II*. М.: URSS, 2013. 384 с.
16. Ellappan, Sundararajan R. *J Electrostat.* 2005, 63, 297–307.
17. Владимиров Ю.А. *Соросовский образовательный журнал*. 2000, 6(9), 2–9.
18. Sowers A.E., Chassy B.M., Chang D.C., Saunders J. *Guide to Electroporation and Electrofusion*. Academic Press, 2012. 569 p.
19. Melikov K.C., Frolov V.A., Shcherbakov A., Samsonov A.V. et al. *Biophys J.* 2001, 80(4), 1829–1836. DOI: 10.1016/S0006-3495(01)76153-X.

*Поступила 22.08.17*

*После доработки 15.02.18*

### **Summary**

To substantiate the quantitative indicators of the process of weeds electric impulse destruction, as well as to elucidate the damage mechanism and the sequence of disturbances that occur in the internal structure of the processed plants, it is necessary to know not only the design of the electrical substitution circuit of the plant tissue, but also to have information about the change character in the parameters of this scheme elements

during electro-damaging. The presented technique allows, by inexpensive and accessible technical means, to control the damage of the weed plants tissues and, using the designed mathematical apparatus, to calculate quantitative indicators. The analysis shows that the process of damaging weed plant tissues is characterized, first of all, by the loss of cell membranes of their semipermeable functions and an increase in the active conductivity of the processed areas of plants. Such changes in the internal organization of plant tissues lead to the loss of cell viability in areas subjected to electric impulse treatment. The presented analysis fits the available concept of biophysical scientists about electrical damage of the internal structure of biological objects. The conducted technological studies of the process of electric impulse irreversible damage to plant tissues, based on the analysis presented in the article, allow to limit the electric energy supplied for this, which makes it possible to realize the electric impulse weeding as an energy-saving way of combating weed vegetation.

*Keywords: electric impulse weeding, irreversible electrical damage of plant tissue, electric substitution scheme of weeds' plant tissue, change of parameters of the substitution scheme.*