

где A – расстояние от источника ионов до фокусирующей линзы; F_{xy} и F_{xz} – фокусные расстояния линзы в радиальной и аксиальной плоскостях.

Из приведенных уравнений следует, что радиальная фокусировка ионов по направлению осуществляется только электрическим полем линзы, а аксиальная – электрическим полем линзы и магнитным полем призмы. Поэтому для фокусировки ионов по двум направлениям фокусные расстояния F_{xy} и F_{xz} должны быть различны. Величины этих фокусных расстояний определяются из условий фокусировки по направлению (1) и (2).

Экспериментальные исследования масс-анализатора с магнитным полем Γ^1 и электрической фокусировкой ионов по направлению выполнялись на масс-спектрометре, в котором функцию разделения ионов по массам выполнял масс-анализатор с параметрами: $n = 1$, $r_m = 0,1$ м, $L_m' = 0,18$ м, $\alpha_m = 270^\circ$, $L_m'' = 0$, $A = 0,32$ м. В качестве фокусирующей системы экспериментального масс-спектрометра использовалась одиночная электростатическая линза, состоящая из трех цилиндрических электродов, крайние из которых были соединены с корпусом масс-спектрометра, а на средний подавался регулируемый положительный потенциал [4].

Для создания ионного пучка использовался щелевой источник ионов с ионизацией молекул исследуемого вещества электронным ударом. Ширина выходной щели источника ионов $S_1 = 0,0001$ м, начальный разброс энергий ионов $\Delta U/U = 10^{-3}$. Принимая во внимание, что при выбранных параметрах масс-анализатора дисперсия $D_m = r_m \alpha_m^2 / 4$, а геометрическое увеличение $M = -2$, была вычислена разрешающая способность прибора с учетом аббераций первого порядка. Она оказалась равной

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{D_m}{2|M|S_1 + D_m} \frac{\Delta U}{U} = 370.$$

Исследование основных характеристик масс-спектрометра проводилось при напуске в источник ионов смеси криптона и воздуха. Юстировка прибора заключалась только в подборе оптимального режима источника ионов и соответствующего потенциала среднего электрода электростатической линзы. Никаких механиче-

ских перемещений электромагнита масс-анализатора и других узлов ионно-оптической системы не требовалось. Максимальная разрешающая способность масс-спектрометра с одиночной электростатической линзой при энергии ионов $U = 2,6$ В и ширине щели приемника ионов $S_2 = 0,0004$ м была 570 на уровне 10% высоты пиков спектра масс. Это почти в четыре раза выше величины разрешающей способности масс-спектрометра с однородным магнитным полем и таким же радиусом центральной траектории ионов.

Дальнейшее улучшение аналитических параметров масс-спектрометра с полем Γ^1 и электрической фокусировкой ионов по направлению было достигнуто за счет применения более совершенной фокусирующей системы. Вместо одиночной линзы между источником ионов и масс-анализатором была установлена фокусирующая система из квадрупольно-октупольных линз. Разрешающая способность масс-спектрометра после этого возросла до 800, а чувствительность увеличилась в три раза. Режим работы ионного источника и начальные параметры ионного пучка не изменялись. Улучшение характеристик масс-спектрометра достигнуто за счет коррекции сферической абберации и более эффективной по сравнению с одиночной линзой фокусировкой ионов в аксиальной плоскости. Аналитические параметры масс-спектрометра при его эксплуатации были стабильны во времени.

Выводы

В итоге выполненных исследований установлены ионно-оптические свойства и характеристика магнитных масс-анализаторов с большой неоднородностью поля. Показано, что применение в таких системах электрической фокусировки ионов по направлению или ее сочетание с магнитной является простым и удобным средством улучшения их характеристик. Определены рациональные варианты конструкции масс-анализаторов с магнитным полем большой неоднородности и электростатических фокусирующих систем к ним. Полученные в работе результаты подтверждают перспективность практического применения магнитных полей большой неоднородности для анализа ионных пучков в масс-спектрометрии.

Список використаної літератури:

1. Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. – М.: Атомиздат, 1977. – 302 с.
2. Шеховцов Н.А. Магнитные масс-спектрометры. – М.: Атомиздат, 1971. – 232 с.
3. Кузема А.С., Савин О.Р., Чертков И.Я. Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 288 с.
4. Кузема А.С., Соловьева А.Е. // Вісник СНАУ 1(17) 2008, С. 156-160.
5. Шпак Е.В., Явор С.Я., Савин О.Р., Кузема А.С. // Журн. техн. физики 39(9) 1969, С. 1720-1723.

Изложены методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований ионно-оптических свойств и характеристик статических масс-анализаторов с магнитным полем боль-

шой неоднородности. Показана перспективность применения таких магнитных полей для анализа ионных пучков в масс-спектрометрии.

The technique and results of theoretical and experimental study of ion-optical properties and characteristics of static mass analyzers with highly inhomogeneous magnetic field are described. The perspectives of such magnetic fields application for the analysis of ion beams in mass spectrometry have been shown.

Дата надходження в редакцію: 21.04.2012. р.

Рецензент: д.т.н., професор Кочмола М.М.

УДК [621.3:537] 635

ВОЗДЕЙСТВИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СЕМЕНА И КОРНЕВУЮ СИСТЕМУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Ю.Н. Куценко, Таврический государственный агротехнологический университет

В.Ф. Яковлев, к.т.н., профессор, Сумской национальный аграрный университет

Г.В. Степанчук, ФГБОУ ВПО Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия

Е.Л. Ключка, ФГБОУ ВПО Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия

На основе проведенного теоретического анализа получена математическая модель, которая позволяет исследовать протекание обменных процессов на уровне мембраны клетки в установленном режиме, при воздействии стационарного электрического поля

Постановка проблемы. Существует достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов, в которых с теоретической и экспериментальной точек зрения рассматривается взаимодействие высокочастотных электромагнитных полей СВЧ и КВЧ диапазонов с биологическими объектами разной природы и с разными геометрическими и электрофизическими свойствами. В результате этого взаимодействия можно получать изменения жизненных процессов, происходящих в тканях этих объектов. Такие изменения могут нести как положительный, так и отрицательный характер [1,2].

Поэтому, анализ и исследования воздействия электрического поля на обменные процессы в растительных объектах являются актуальными и требуют дальнейших исследований.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования воздействия ЭМП и СВЧ и КВЧ полей проводились и с семенами сельскохозяйственных культур с целью повышения их урожайности, улучшения биохимических свойств, а также устойчивости по отношению к возможным вредителям. При этом, как правило, подобная обработка семян электромагнитными полями происходила в воздушной среде в свободном пространстве или в направляющих системах [3]. Однако следует отметить, что стимулирующее или ингибирующее действие на биологические объекты может оказывать и стационарное электрическое поле, в котором находятся данные объекты. В полной мере это относится и к семенам и корневым системам сельскохозяйственных культур, находящихся в грунте.

Однако, в статье рассмотрена только модель распределения электростатического поля в почве, вызванного помещенным в грунт единичным заряженным штырем.

Формулирование цели статьи. Работа направлена на обоснование математической модели для исследования процессов, происходящих в семенах и корневой системе растений под воздействием стационарного электрического поля.

Изложение основного материала. Учитывая электрические свойства, которыми обладают тканевые клетки, естественно предположить, что внешние электромагнитные поля должны оказывать на них определенное влияние. Естественно, что это в полной мере относится как к переменным, так и к стационарным электрическим полям. Следует ожидать, что электростатические поля должны менять концентрацию жизненно важных ионов на поверхности клеточных мембран. Существующие исследования подтверждают возможность воздействия с помощью внешних электрических полей на процессы, происходящие на клеточном уровне.

Внешние электростатические поля не только меняют концентрацию ионов на мембранах, но и могут приводить к потере клетками определенного типа ионов, о чем свидетельствуют результаты различных экспериментов. В данной работе предлагаются модели взаимодействия полей с биообъектами [4, 5].

Изменение концентрации ионов в возбудимой клетке связано с тем, что ее мембрана обладает свойством избирательной проницаемости. Это означает, что определенные типы ионов могут легко проходить сквозь мембрану, а другие типы ионов проходят с трудом или совсем не могут пройти. Как известно, ионные составы внутри и вне клеток сильно различаются. В связи с этим имеет место начальное диффузионное движение ионов способных проникнуть сквозь мембрану. Это ведет к накоплению зарядов на обеих сторонах мембраны как на емкости и к возникновению

электрического поля на мембране. Таким образом, мембрана вызывает не только движение ионов сквозь нее, но и способствует возникновению электрического поля. Указанные процессы хорошо описываются уравнением Нернста-Планка, которое позволяет определить равновесные условия, соответствующие термодинамическим закономерностям [6].

Диффузия ионов ведет к накоплению положительного заряда во внешней для клетки среде и оставляет внутри клетки избыток отрицательного заряда, который благодаря электростатическим силам собирается на мембране. Это приводит к образованию электростатического поля, направленного от внешней к внутренней среде, которое возрастает по величине, по мере диффузии положительных ионов изнутри клетки наружу. Возрастающее электрическое поле все более препятствует диффузии, пока она не прекращается совсем и не наступает равновесие [7].

При равновесии сила электрического поля в точности компенсирует диффузионную силу. Как известно [6], количественно диффузия описывается законом Фика

$$j_d = -D \text{grad} C \quad (1)$$

где D - коэффициент пропорциональности или постоянная Фика;

C - концентрация некоторого вещества как функция пространственных координат.

Плотность тока j_d представляет собой число ионов, проходящих за единицу времени через единичную площадку поверхности мембраны. Обычно постоянная Фика определяется опытным путем.

В связи с наличием у ионов заряда на них действуют также силы со стороны электрического поля. Интенсивность возникающего в результате этого потока j_e зависит от подвижности ионов данного сорта. Подвижность характеризуется величиной v_p , то есть скоростью, достигаемой под действием поля единичной напряженности для ионов данного типа. Если валентность иона Z_p , то плотность ионного потока описывается формулой

$$j_e = -v_p \frac{Z_p}{|Z_p|} C_p \text{grad} \psi \quad (2)$$

где $(\text{grad} \psi)$ - напряженность электрического поля;

$\frac{Z_p}{|Z_p|}$ - знак силы, действующей на ион типа p .

Очевидно, что при наличии, как диффузионных сил, так и сил электрического поля полная плотность ионов данного сорта равна

$$j_p = -D_p \text{grad} C_p - \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi = -D_p \left(\text{grad} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \right), \quad (3)$$

Как было сказано выше, при равенстве сил электрического поля и диффузионных сил плотность электрического тока, обусловленного движением ионов, становится равной нулю, то есть $J_p = 0$. Таким образом,

$$D_p F Z_p \left(\text{grad} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \right) = 0$$

откуда следует

$$\text{grad} C_p = -\frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \quad (4)$$

Для простоты будем считать, что все величины меняются по нормальному к мембране направлению, которое совпадает в полярной системе координат с координатой r . Это возможно сделать, поскольку практически каждый участок мембраны можно считать плоским [6]. Используя выражение для градиента в полярной системе координат, можно (4) представить в виде

$$\frac{dC_p}{dr} = -\frac{Z_p C_p F}{RT} \frac{d\psi}{dr} \quad (5)$$

Получено дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными C_p и ψ . Разделяя эти переменные и интегрируя левую и правую части по толщине мембраны, на которой установилось равновесие, получаем равенство

$$\int_{r_i}^{r_e} \frac{dC_p}{C_p} = -\frac{Z_p F}{RT} \int_{r_i}^{r_e} d\psi, \quad (6)$$

где r_i - координата, соответствующая внутренней стенке мембраны;

r_e - координата, соответствующая внешней стенке мембраны;

В результате интегрирования получается соотношение

$$\ln \frac{C_{pe}}{C_{pi}} = -\frac{Z_p F}{RT} (\psi_e - \psi_i) \quad (7)$$

где C_{pe} и C_{pi} - концентрация ионов типа p снаружи и внутри мембраны, соответственно;

ψ_e и ψ_i - внешний и внутренний потенциал мембраны.

Из равенства (7) следует, что в условиях равновесия потенциал мембраны равен

$$U_m = \psi_i - \psi_e = \frac{RT}{Z_p F} \ln \frac{C_{pe}}{C_{pi}} \quad (8)$$

Проведенные вычисления позволили определить диапазон величин потенциала покоя, создаваемого основными типами ионов внутри и внеклеточной среды, таких как калий, натрий, хлор и др. Полученные результаты лежат в диапазоне от 70 мВ до 105 мВ, то есть в среднем, с учетом концентраций этих ионов, потенциал покоя на мембране равен примерно 70 мВ.

Построенная выше математическая модель позволяет исследовать протекание обменных процессов на уровне мембраны клетки в установившемся режиме, то есть когда силы диффузии компенсируются силами возникающего на мембране электрического поля. Очевидно, что изменение внешних условий, в которых находится биологическая ткань, может нарушить данное равновесие и привести к изменению процесса диффузии ионов, следствием чего будет изменение гомеостаза в семенах сельскохозяйственных растений или в их корневой системе, поскольку речь идет о возникновении дополнительного электро-статического поля в грунте.

Выясним, каким образом происходят данные изменения. Из анализа экспериментальных данных и теоретических моделей следует [4,5], что объединенные процессы связи поверхностных взаимодействий с внутриклеточными механизмами сначала распространяются по поверхности мембраны, а затем информация передается внутрь клетки, что также представляет собой новый принцип в моделях молекулярной биологии процессов возбуждения.

Чтобы выяснить, каким образом изменяют обменные процессы внешние электростатические поля, рассмотрим задачу о диффузии вещества во внутреннюю область клетки через мембрану [7,8]. Ионы могут проходить через мембрану под действием химического или электрического потенциала в качестве движущей силы. Для того чтобы получить суммарный поток ионов через мембрану посредством химического потенциала, необходима разница в активности двух поверхностей мембраны. Скорость переноса ионов может быть увеличена, если ионам оказывается помощь каким-то несущим элементом. Это является результатом каких-то еще полностью не объясненных механизмов переноса, которые работают только в живой материи. В этих случаях можно достигать быстрого прохода ионов, несмотря на низкую проникающую способность самого иона.

Достаточно часто случается, что ион переносится против разности электрохимического потенциала. Это, как предполагают, происходит посредством поглощающего энергию несущего механизма. Известны многие подобные явления, в особенности для натрия и калия. Это объясняет тот факт, что внутренняя часть клетки очень часто имеет высокую концентрацию калия и низкую концентрацию натрия по сравнению с окру-

жающей средой. Эти явления называются соответственно натриевым и калиевым насосом.

Этот так называемый активный перенос зависит от энергии, находящейся вне своей собственной системы. Энергия и носитель производятся клеткой. Энергия приходит из митохондрий, а носитель - из механизмов клетки. Принимая во внимание, что мембрана очень тонкая, процесс проникновения вещества через нее описывается уравнением [6,7,8]

$$\frac{1}{S} \frac{dm}{dt} = D(C_e - C_i) \quad (9)$$

где S - площадь поперечного сечения мембраны;

m - масса проходящего вещества;

D - проницаемость мембраны;

C_e, C_i - концентрация ионов вне и внутри клетки.

Математические задачи о диффузии вещества во внутреннюю область клетки достаточно упрощаются, если скорость проникновения вещества через клеточную оболочку много меньше скорости диффузии по обе ее стороны. Следствием дополнительной диффузии внутрь клетки под действием внешних факторов будет увеличение объема клетки.

Следует отметить, что даже при очень больших изменениях объема площадь поверхности клетки остается почти постоянной. Таким образом, по объему можно судить о концентрации веществ внутри клетки. Поскольку площадь поверхности не меняется, то можно вычислить коэффициент проницаемости D . Удобнее измерять не площадь, а величину проницаемости

$$P = D \cdot S \quad (10)$$

Поскольку, как было сказано, диффузия протекает быстрее, чем проникновение через мембрану, то можно считать, что

$$C_i = \frac{m}{V} \quad (11)$$

где V - объем клетки.

Тогда уравнение (9) примет вид

$$\frac{dm}{dt} = P \left(C_e - \frac{m}{V} \right) \quad (12)$$

По мере увеличения в клетке концентрации вещества, через оболочку возникает ток воды, направленный внутрь. Предположим, что равновесие для воды устанавливается мгновенно. Это допущение эквивалентно тому, что осмотическое давление внутри клетки, определяемое суммой концентраций проникающего C_i и непроникающего C_0 вещества, совпадает с осмотическим давлением вещества в окружающей среде, концентрация которого постоянна и равна C_e

$$C_e = C_{i0} + C_0 = C_i + \frac{C_0 V_0}{V} = \frac{m + C_0 V_0}{V} \quad (13)$$

где C_0 - концентрация C_i , в начальный момент времени;

V_0 - объем клетки в начальный момент времени.

Из (13) следует:

$$m = C_e V - C_0 V_0 \quad (14)$$

$$dm = C_e dV. \quad (15)$$

Подставляя (15) в уравнение (12), получим с учетом (14)

$$\frac{dV}{dt} = P \left(1 - \frac{m}{C_e V} \right) = P \left(1 - \frac{C_e V - C_0 V_0}{C_e V} \right) = P \frac{C_0 V_0}{C_e V} \quad (16)$$

Это уравнение описывает изменение объема клетки при отсутствии внешнего электромагнитного поля.

Пусть теперь биологическая клетка находится во внешнем электростатическом поле, создаваемом погруженными в почву заряженными металлическими штырями

$$|\vec{E}| = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}'_1|^n}{|\vec{r} - \vec{r}'_1|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}'_2|^n}{|\vec{r} - \vec{r}'_2|^{n+1}} + \frac{|\vec{r}_{03} - \vec{r}'_3|^n}{|\vec{r} - \vec{r}'_3|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{04} - \vec{r}'_4|^n}{|\vec{r} - \vec{r}'_4|^{n+1}} \right)$$

направленном перпендикулярно плоскости поперечного сечения клетки, которую будем считать шаром.

В этом случае в результате влияния внешнего электростатического поля возникает некоторый эквивалентный ему дополнительный заряд ионов в клетке с концентрацией C_s . Чтобы найти эту концентрацию, воспользуемся вторым уравнением из системы Максвелла в случае электростатики. Возьмем от обеих частей этого уравнения интеграл по объему сосредоточения этого заряда V_1

$$\iiint_{V_1} \operatorname{div} \vec{D} dV = \iiint_{V_1} \rho dV \quad (17)$$

С учетом, что исследуемые среды считаются однородными и изотропными, можно записать в виде

$$\varepsilon_3 \varepsilon_0 \iiint_{V_1} \operatorname{div} \vec{E} dV = \iiint_{V_1} \rho dV \quad (18)$$

где ε_3 - относительная диэлектрическая проницаемость биологической ткани (зерна, корневой системы и т.д.)

Тогда, учитывая, что правая часть (18) - это эквивалентный дополнительный заряд ионов, а к левой части применяя теорему Остроградского-Гаусса, получаем

$$4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 |\vec{E}| a^2 = qV_1 C_s \quad (19)$$

где a - радиус шара, эквивалентного клетке;
 q - заряд иона, или

$$C_s = \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2}{qV_1} |\vec{E}| \quad (20)$$

Уравнение (20) с учетом внешнего электростатического поля будет иметь вид

$$\frac{dV}{dt} = P \frac{C_0 V_0}{C_e V} + P \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2}{C_e q V_1} |\vec{E}| \quad (21)$$

Для упрощения этого уравнения положим $V = V_1$, что с достаточной для поставленной задачи точностью соответствует реальной ситуации

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P}{C_e V} \left(C_0 V_0 + \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right) \quad (22)$$

Интегрируя уравнение (22), получаем

$$V^2 = \frac{2P}{C_e} \left(C_0 V_0 + \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right) t + C \quad (23)$$

Так как в начальный момент времени $t = 0$ объем клетки $V = V_0$, то значение постоянной интегрирования будет

$$C = V_0^2$$

Таким образом, частное решение уравнения (22), с учетом зависимости начального объема рассматриваемой клетки и концентрации проникающего вещества C_0 от потенциала на его мембране [7,8], имеет вид

$$V^2 = V_0^2 + \frac{2P}{C_e} \left(C_0 V_0 e^{\frac{qFU_{0m}}{RT}} + \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right) t \quad (24)$$

где F - число Фарадея;

U_{0m} - потенциал на мембране в начальный момент времени;

R - газовая постоянная;

T - абсолютная температура.

Это решение (24) позволяет определить изменение объема клетки за счет проникающих в нее веществ под действием внешнего электростатического поля.

Очевидно, что изменение объема клетки, связанное с увеличением концентрации ионов внутри нее, приведет к изменению потенциала на мембране. Используя введенное ранее понятие эквивалентного заряда, получим для потенциала на мембране клетки следующее выражение

$$\psi^2 = U_{0m}^2 + \frac{PC_e q d^2}{2\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2} \left(\frac{qC_0 V_0}{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2} e^{\frac{qFU_{0m}}{RT}} + |\vec{E}| \right) t \quad (25)$$

где d - толщина мембраны.

Отсюда следует

$$\psi = \sqrt{U_{0m}^2 + \frac{PC_e q d^2}{2\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2} \left(\frac{qC_0 V_0}{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0 a^2} e^{\frac{qFU_{0m}}{RT}} + |\vec{E}| \right) t} \quad (26)$$

Полученное выражение (26) позволяет оценить процессы, происходящие на клеточном уровне в клетках семян или корневой системы растений, находящихся в почве под воздействием электростатического поля. Это связано с тем, что величина мембранного потенциала влияет на протекание обменных процессов в клетке и показывает, каким образом изменяются ее энергетические показатели.

Вывод. Построенная математическая модель позволяет исследовать протекание обмен-

ных процессов на уровне мембраны клетки в установившемся режиме.

Очевидно, что изменение внешних условий, в которых находится биологическая ткань, может нарушить данное равновесие и привести к изменению процесса диффузии ионов, следствием чего будет изменение гомеостаза в семенах сельскохозяйственных растений или в их корневой системе.

Список использованной литературы:

1. Таранов М.А., Федорищенко М.Г. Расчет установок для предпосевной электромагнитной обработки семян сорго. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2001. - №11. - С. 23 - 26.
2. Ляпин В.Г., Инкин А.И. Поглощение электромагнитной энергии в растительной ткани. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2002. - №11. - С. 6 - 8.
3. Игнатов В.В. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов, В.И. Панасенко, А.П. Пиденко и др. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. - С. 80.
4. Куценко Ю.Н. Моделирование стационарного электрического поля, взаимодействующего с семенами и корневой системой сельскохозяйственных культур в грунте / Ю.Н. Куценко, А.Е. Пиротти, Е.Л. Пиротти // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный журнал. – 2011. - №5. - С.66-69.
5. Куценко Ю.Н. Распределение потенциалов в корнеобитаемой среде / Ю.Н. Куценко // Зб. наук. праць ХДТУСГ «Питання електрифікації сільського господарства (50 років – ювілейний випуск)» – Харків: ХДТУСГ, 1998. - С. 131-136.
6. Крутецкая З. И. Биофизика мембран: Учеб. Пособие / З.И. Крутецкая, А.В. Лонский – С.-Пб: Санкт-Петербургский государственный университет, 1994. - 287 с.
7. Никольский В.В., Электродинамика и распространение радиоволн/ В.В. Никольский, Т.И. Никольская// – М.: Наука, 1989. - 543 с.
8. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.

На основі проведеного теоретичного аналізу отримана математична модель, яка дозволяє досліджувати перебіг обмінних процесів на рівні мембрани клітини в сталому режимі, при впливі стаціонарного електричного поля

Based on the theoretical analysis of the mathematical model, which allows us to study the course of metabolic processes at the level of the cell membrane in the steady state, when exposed to a stationary electric field.

Дата надходження в редакцію: 28.05.2012. р.

Рецензент: д.ф.-м.н., професор Кузема О.С.