

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОБЪЕМЕ С ВОДОЙ МЕЖДУ ОБКЛАДКАМИ КОНДЕНСАТОРА

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10210

**Арутюнян Роберт Владимирович**,  
Московский государственный технический  
университет имени Н.Э.Баумана, Москва, Россия,  
[rob57@mail.ru](mailto:rob57@mail.ru)

**Ключевые слова:** электролит, статическое  
электрическое поле, расчет.

Моделирование электрического поля в растворах электролитов может быть актуальным для электротехнических систем и электроники, например, в связи с широким применением суперконденсаторов. Обработка растворов магнитными и электрическими полями является одним из перспективных направлений прикладной электрической химии. Значительная часть работ в этой области преимущественно относится к исследованию влияния протекающего в растворе электрического тока. В литературе, как правило, исследуется воздействие стороннего магнитного поля на движущийся раствор электролита, приводящее к возникновению в растворе циркулирующих ионных токов и плотного ионного, т.н. двойного электрического слоя (ДЭС).

Исследования воздействия стороннего статического электрического поля на свойства объема электролита осуществлялись в меньшей степени. Поскольку модель диффузного ДЭС является недостаточной, то при расчете электрического поля учитывается также плотный слой ионов (специфическая адсорбция), что соответствует более совершенной модели Штерна. Рассмотрена система уравнений, описывающих статическое электрическое поле и диффузию в конечном объеме водного раствора. Осуществлен расчет электростатического поля в объеме дистиллированной и обычной воды. Учтены такие факторы, как размеры биообъектов, конвекция, учет объема, занимаемого ионами, степень гидратации ионов, водопоглощение плексигласа, токи утечки, возможность пробоя, поверхностная проводимость, диффузия протонов.

Полученные результаты позволяют прийти к следующим выводам: электростатическое поле в объеме воды практически полностью отсутствует, так как экранировано микроскопически тонким слоем ионов в двойном электрическом слое и никоим образом не может влиять на жизнедеятельность организмов. Следовательно, феномен, открытый в лаборатории химического концерна CIBA-GEIGY (ныне Novartis), предположительно, объясняется не влиянием стороннего электростатического поля, а факторами иной, еще не исследованной природы.

Результаты проведенных исследований могут также применяться при расчетах электротехнических устройств с перекрывающимися ДЭС, например, суперконденсаторов (ионисторов), а также при исследованиях биореакторов.

#### Информация об авторе:

**Арутюнян Роберт Владимирович**, к.ф.-м.н., доцент кафедры Вычислительная математика и математическая физика, Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана, Москва, Россия

#### Для цитирования:

Арутюнян Р.В. Моделирование электрического поля в объеме с водой между обкладками конденсатора // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №1. С. 22-28.

#### For citation:

Arutyunyan R.V. (2019). Modeling of the electric field in the volume with water between the condenser lines. *T-Comm*, vol. 13, no.1, pp. 22-28. (in Russian)

**Введение**

Моделирование электрического поля в растворах электролитов может быть актуальным для электротехнических систем и электроники, например, в связи с широким применением суперконденсаторов. Анализ литературы показывает, что обработка растворов магнитными и электрическими полями является одним из перспективных направлений прикладной электрической химии [1-12].

Значительная часть работ в этой области преимущественно относится к исследованию влияния протекающего в растворе электрического тока [1-2, 4, 5, 11, 12]. В [2, 4, 5] исследуется воздействие стороннего магнитного поля на движущийся раствор электролита, приводящее к возникновению в растворе циркулирующих ионных токов и плотного ионного, т.н. двойного электрического слоя (ДЭС). Исследования воздействия стороннего статического электрического поля на свойства объема электролита осуществлялись в меньшей степени. Это, в частности, объясняется существованием теории ДЭС [1,13], согласно которой стороннее статическое электрическое поле проникает в слой электролита на расстояние порядка дебаевского радиуса.

Сложившееся традиционное мнение было подвергнуто испытанию в результате сенсационных исследований [9], осуществленных в лаборатории одного из крупнейших в мире химических концернов CIBA-GEIGY (нынешнее название Novartis). На основании результатов данного исследования был получен европейский патент [9].

В описании патента и ряде научно-популярных передач телевидения ФРГ [10] утверждается, что воздействие стороннего статического электрического поля, многократно повышало всхожесть семян, урожайность зерновых, улучшало плодовитость, размеры и прочие качества рыб, выведенных из икры в объеме обрабатываемого водного раствора. При этом подчеркивается, что в объеме с водой отсутствовал электрический ток. В европейских СМИ представителями химического концерна была организована масштабная реклама исследований их лаборатории.

Однако теоретическое обоснование эффективности метода обработки раствора в описании патента [9], как показывает анализ выполнено неполным образом, так как для расчета электрического поля применяется только соотношение для равномерного электрического поля, создаваемого источником постоянного напряжения величиной в несколько киловольт.

Игнорируемая в работе [9] теория ДЭС разработана для бесконечного слоя электролита. В статьях автора [6-8] на основе модели диффузного ДЭС для случая конечного объема раствора рассчитаны значения электрической напряженности, малые значения которой, свидетельствуют что, статическое электрическое поле не является причиной значимого воздействия на биообъекты, помещенные в обрабатываемый раствор.

Поскольку модель диффузного ДЭС является недостаточной (например, неточна при расчете емкости ДЭС), то в данной статье при расчете электрического поля учитывается также плотный слой ионов (специфическая адсорбция), что соответствует более совершенной модели Штерна.

**Система уравнений, описывающих статическое электрическое поле и диффузию в конечном объеме водного раствора**

Схема установки, приводимая в [9], показана на рис. 1. Объем раствора находится в емкости из плексигласа, имеющей форму параллелепипеда. В днище и крышке емкости находятся залитые плексигласом плоские алюминиевые электроды, герметически изолированные от воды и воздуха, соединенные с источником постоянного напряжения. Плексиглас является признанным по своим качествам изоляционным, водостойким материалом (из него, в частности, изготавливают аквариумы). Других источников электромагнитного поля, воздействующих на воду или водный раствор электролита нет.

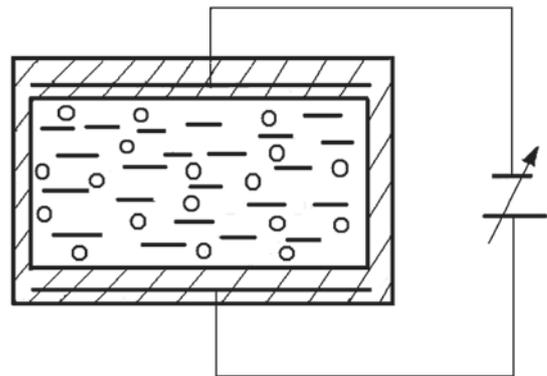


Рис. 1

Электрическое поле в объеме раствора определяется величинами приложенного к электродам напряжения  $U$  (которое предполагается постоянным и равным нескольким десяткам киловольт), концентрацией, подвижностями и пространственным распределением заряженных частиц в объеме электролита, размерами аквариума ( $l_a \approx 0,1 - 0,3 м$ ), толщиной ( $h_{ст} \approx 5 мм$ ) и материалом стенок.

Существуют три основных модели ДЭС: Гельмгольца, Гуи-Чапмена и Штерна [1,13]. Первая из них предполагает, что весь избыточный заряд равномерно распределен на некотором фиксированном расстоянии (порядка радиуса молекулы воды) от границы раствора, так что ДЭС оказывается аналогичным обычному конденсатору. Данная теория не объясняет зависимость емкости от концентрации раствора и температуры. Этот недостаток устранен в модели Гуи-Чапмена, в которой рассматривается диффузный ДЭС, в котором распределены ионы раствора в соответствии с формулой Больцмана. Эта теория смогла объяснить уменьшение емкости при разбавлении раствора, но оказалась хуже простой модели Гельмгольца при расчете емкости ДЭС.

Современная теория ДЭС основана на модели Штерна, являющаяся обобщением двух первых моделей. В модели Штерна учтено явление специфической адсорбции ионов и предполагается, что ДЭС состоит из двух частей: плотного и диффузного, условно разделенных внутренней и внешней плоскостями Гельмгольца (ВнПГ и ВшПГ, см. рис. 2).

Толщина плотного слоя, примыкающего к электроду, равна радиусу гидратированных ионов (3-4 Å), а его диэлектрическая проницаемость значительно ниже  $\epsilon$  раствора из-за ориентации диполей растворителя под действием электрического поля. Толщина диффузного слоя теоретически бесконечна.

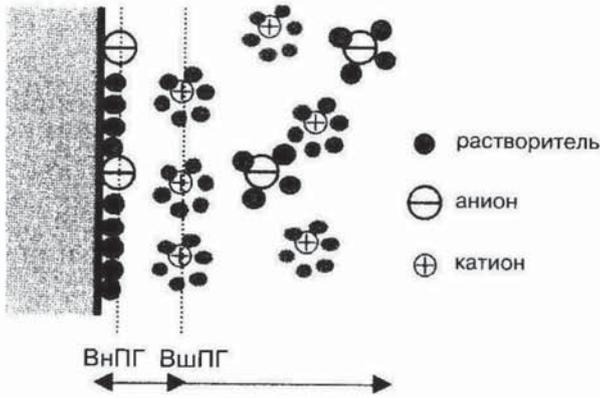


Рис. 2. Строение ДЭС по Штерну

При перечисленных условиях по причине симметрии геометрической формы объема и электродов электрическое поле является плоскопараллельным и может быть описано следующей одномерной краевой задачей (КЗ) [3-8]:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = 0, 0 < x < h_{ct}, l_a + h_{ct} < x < l_a + 2h_{ct}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – электростатический потенциал,  $x$  – абсцисса,  $l_a$  – длина аквариума,  $h_{ct}$  – толщина стенки аквариума.

Уравнения для электрического потенциала и концентраций ионов в диффузной области:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_B}, \quad (2)$$

$$\rho = q(C^+ - C^-),$$

$$D^\pm \frac{d^2C^\pm}{dx^2} \pm \frac{d}{dx}(C^\pm \mu^\pm \frac{d\varphi}{dx}) = 0, h_{ct} < x < l_a + h_{ct}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_B$  – диэлектрическая постоянная раствора,  $C^\pm$  – концентрации положительных (индекс “+”) и отрицательных (индекс “-”) свободных зарядов в воде,  $D^\pm$  – коэффициенты диффузии,  $\mu^\pm$  – подвижности ионов,  $q$  – заряд ионов (в дальнейшем предполагаем, что ионы однозарядные, поэтому  $q = e$ , где – заряд электрона).

**Учет явления специфической адсорбции.** Предполагим, что определяющим фактором адсорбции является силы Ван-дер-Ваальса. Для случая однозарядных ионов в условиях локального термодинамического равновесия плотность заряда ионов в плотном ионном слое равна:

$$\rho(x) = eC_*^+ \exp\left(\frac{\Psi_{алс}^+(x)}{k_B T}\right) - eC_*^- \exp\left(\frac{\Psi_{алс}^-(x)}{k_B T}\right),$$

где  $C_*^+, C_*^-$  – концентрации положительных и отрицательных ионов на границе между диффузионным и плотным

слоями,  $\Psi_{алс}^-(x), \Psi_{алс}^+(x)$  – потенциалы адсорбции отрицательных и положительных ионов, которые преимущественно определяется силами Ван дер Ваальса, зависящими от расстояния приблизительно по закону  $x^{-6}$ . Энергия адсорбции принимает значения порядка 10-20 кДж/моль.

Поверхностная плотность заряда  $\sigma$  может быть приближенно определена посредством интегрирования величины  $\rho(x)$  в пределах плотного слоя на аноде  $[h_{ct}, h_{ct} + a_A]$  и на катоде  $[l_a + h_{ct} - a_K, l_a + h_{ct}]$ :

$$\sigma_A \approx \int_{h_{ct}}^{h_{ct} + a_A} \rho(x) dx, \quad \sigma_K \approx \int_{l_a + h_{ct} - a_K}^{l_a + h_{ct}} \rho(x) dx,$$

где  $a_A, a_K$  – толщина плотного слоя, примыкающего к электроду на аноде и катоде соответственно, приблизительно равная радиусу гидратированных ионов (3-4 Å), что много меньше характерного размера диффузной части ДЭС – дебаевского радиуса.

Краевые условия для электрического потенциала и концентраций ионов на границе диэлектрик – электролит:

$$\begin{aligned} \phi(0) = U, \quad \phi(l_a + 2h_{ct}) = 0, \\ \phi(h_{ct} - 0) = \phi(h_{ct} + 0), \quad \phi(l_a + h_{ct} - 0) = \phi(l_a + h_{ct} + 0), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\epsilon_p \frac{d\phi}{dx}(h_{ct} + 0) - \epsilon_{ct} \frac{d\phi}{dx}(h_{ct} - 0) = \sigma_A,$$

$$\epsilon_{ct} \frac{d\phi}{dx}(l_a + h_{ct} + 0) - \epsilon_p \frac{d\phi}{dx}(l_a + h_{ct} - 0) = \sigma_K,$$

$$-D^\pm \frac{dC^\pm}{dx} \mp C^\pm \mu^\pm \frac{d\phi}{dx} = 0, x = h_{ct}, x = l_a + h_{ct}, \quad (5)$$

где (4) – краевые условия для электростатического потенциала, (5) – для ионных концентраций.

Поскольку предполагается отсутствие электрического тока в системе, то средняя по объему концентрация ионов остается неизменной (закон сохранения заряда):

$$\frac{1}{l_a} \int_{h_{ct}}^{l_a + h_{ct}} C^\pm(x) dx = C_{i0}, \quad (6)$$

$C_{i0}$  – концентрация ионов в объеме раствора в отсутствие поля.

В силу условий (5), (6) в объеме раствора дрейфовая и диффузионная составляющие токов уравниваются друг друга и суммарный ток отсутствует.

**Решение системы (1) – (6)**

может быть выражено в квадратурах при помощи стандартных аналитических методов.

Из уравнения (1) следует, что напряженность электрического поля внутри стекла  $E_{ct}$  является постоянной, поэтому значение потенциала на границе диэлектрик – раствор равно:

$$\phi(h_{ct}) = U - E_{ct} h_{ct},$$

Решением уравнения диффузии (3) с учетом краевых условий (5) и соотношения Нернста-Эйнштейна для подвижностей ионов являются функции

$$C^{\pm} = A_{\pm} \exp\left(\mp \frac{e(\varphi - \varphi_0)}{k_B T}\right), \quad (7)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура раствора,  $A_{\pm}$  – константы, которые могут быть определены из закона сохранения заряда (6).

Поскольку размеры аквариума на много порядков больше дебаевского радиуса и размеров ДЭС, поэтому ДЭС на катоде и аноде практически не взаимосвязаны и их можно исследовать отдельно. По этой причине будем рассматривать анодный ДЭС и все индексы, относящиеся к аноду и катоду опустим. Значения ионных концентраций на середине аквариума также в силу малых по сравнению с длиной аквариума размеров ДЭС практически равны их начальным (равновесным) значениям.

Согласно известным расчетам диффузной части ДЭС [1,3-8], значения электрического потенциала и ионных концентраций в этой части ДЭС приблизительно изменяются по экспоненциальному закону:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \varphi(h_{ct}) \exp\left(\frac{h_{ct} - x}{d}\right), \quad C^- = C_0 \exp\left(\frac{e(\varphi - \varphi_0)}{k_B T}\right), \\ C^+ &= C_0 \exp\left(\frac{e(\varphi_0 - \varphi)}{k_B T}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\varphi_0$ ,  $C_0$  – значения потенциала и ионных концентраций на середине аквариума (последние приблизительно равны их равновесным значениям),  $d$  – дебаевский радиус воды в объеме раствора:

$$d = \sqrt{\frac{\epsilon_B k_B T}{2e^2 C_0}}. \quad (9)$$

Напряженность электрического поля в диффузной части ДЭС приблизительно определяется по формуле:

$$E(x) = \frac{\varphi(h_{ct})}{d} \exp\left(\frac{h_{ct} - x}{d}\right). \quad (10)$$

Качественный вид зависимостей потенциала и напряженности электрического поля в диффузных областях как анодного ( $x < 0,5$ ), так и катодного ( $x > 0,5$ ) ДЭС показан на рис. 3 (случай перекрывающихся ДЭС).

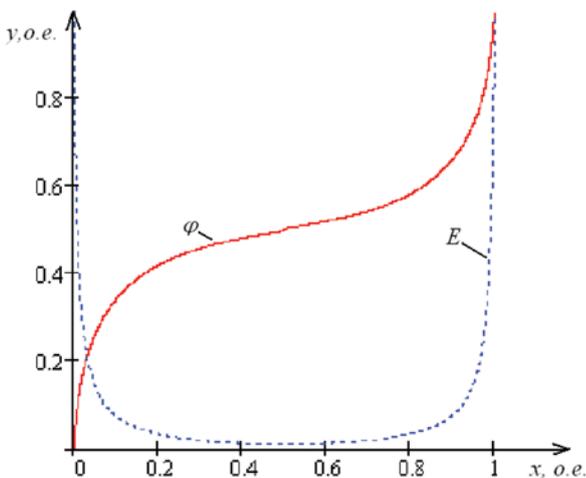


Рис. 3. Нормированные графики потенциала и напряженности поля

Из уравнений (1) – (10) следует, что

$$\varphi(h_{ct}) \approx \frac{U - \varphi_0 - eah_{ct} C_0 (k_{алс}^+ - k_{алс}^-) / \epsilon_{ст}}{1 + \frac{\epsilon_B h_{ct}}{\epsilon_{ст} d} (1 - ak_{алс}^{cp} / d)},$$

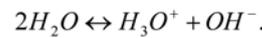
где

$$k_{алс}^{\pm} = \frac{1}{a} \int_{h_{ct}}^{h_{ct}+a} \exp\left(\frac{\Psi_{алс}^{\pm}(x)}{k_B T}\right) dx, \quad k_{алс}^{cp} = (k_{алс}^+ + k_{алс}^-) / 2.$$

### Расчет электростатического поля в объеме дистиллированной и обычной воды

Сделаем на основе выше полученных соотношений численные оценки величины электрического поля в объеме водного раствора. Для этого вначале вычислим значение дебаевского радиуса химически чистой воды  $d_0$ , который, согласно (10), зависит от концентраций ионов.

Известно [13], что в чистой воде проводимость осуществляется ионами водорода  $H^+$  и гидроксид-ионами  $OH^-$ , которые образуются в результате реакций диссоциации  $H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$  и самоионизации



В дистиллированной воде при 25°С концентрация ионов равна [13]:

$$C_{i0} = [H^+] = [OH^-] = 10^{-7} \text{ моль / л} \approx 6,14 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость воды при комнатной температуре равна 81 [14]. После подстановки в (10) соответствующих численных значений, получаем, что дебаевский радиус дистиллированной воды приближенно равен одному микрометру.

Считая  $l_a = 0,03$  м,  $h_{ct} = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\epsilon_{ст} = 2,5\epsilon_0$  (типичный плексиглас [14]), и аппроксимируя линейным образом зависимость энергии адсорбции от координаты в пределах плотного слоя, находим, что при комнатной температуре

$$\exp\left(\frac{\Psi_{алс}^{\pm}(x)}{k_B T}\right) \approx \exp\left(\frac{\Psi_{алс, max}^{\pm} (1 - x/a)}{k_B T}\right),$$

$$\Psi_{алс, max}^{\pm} \approx 15 \text{ КДж/моль},$$

$$\exp\left(\frac{\Psi_{алс, max}^{\pm}}{k_B T}\right) \approx 405, \quad k_{алс}^{cp} \approx 67,3; \quad ak_{алс}^{cp} / d \approx 0,02$$

$$eah_{ct} C_0 (k_{алс}^+ - k_{алс}^-) / \epsilon_{ст} \approx 43. \quad \epsilon_B \frac{h_{ct}}{\epsilon_{ст}} \approx 0,16 \text{ м}.$$

$$\varphi(h_{ct}) \approx \frac{U/2 - 43}{128000},$$

Для дистиллированной воды влияние адсорбции незначительно и расчеты совпадают с результатами [3, 6-8]. При напряжении источника 50 КВ потенциал на границе диффузной части ДЭС равен около 0,2 В, при  $U = 2300$  В потенциал равен 0,018 В, при  $U = 500$  В потенциал равен 0,004 В. В дистиллированной воде, падает напряжение не более 0,4 В, т.е. менее 0,01% от межэлектродного напряжения. Все электрическое поле в воде сосредоточено в тончайшем микроскопическом слое толщиной около 0,01 мм. Напряженность электрического поля в центре объема воды ничтожно мала:  $E_0 < 10^{-5000}$  [В/м].

В обычной пресной воде или в водных растворах электролитов концентрация свободных ионов на много порядков больше, чем в дистиллированной воде, дебаевский радиус имеет значения около 0,1 мкм:

$$ak_{\text{адс}}^{\text{сп}} / d \approx 3 \cdot 10^{-10} \cdot 67,3 / 10^{-7} \approx 0,2 \cdot$$

$$eah_{\text{ст}} C_0 (k_{\text{адс}}^+ - k_{\text{адс}}^-) / \epsilon_{\text{ст}} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-10} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot$$

$$6 \cdot 10^{19} \cdot 67,3 / (2,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}) \approx 4300.$$

$$\varphi(h_{\text{ст}}) \approx \frac{U/2 - 4300}{1280000},$$

При напряжении источника 50 КВ потенциал на границе диффузной части ДЭС равен около 0,016 В, при  $U = 2300$  В потенциал равен -0,0016 В, при  $U = 500$  В потенциал равен -0,003 В. Таким образом, характер зависимости потенциала в ДЭС претерпевает качественное изменение (см. рис. 4).

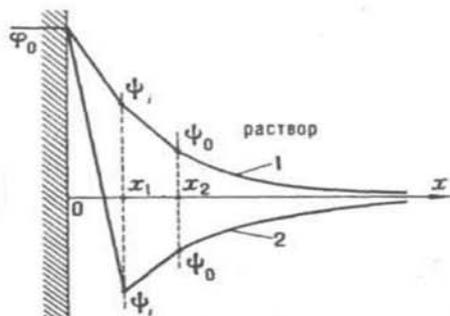


Рис. 4. Качественный вид зависимостей потенциала от координаты в ДЭС: 1 – дистиллят; 2 – обычная водопроводная вода;  $x_1$  – граница адсорбционного слоя;  $x_2$  – диффузная часть

В обычной пресной воде или в водных растворах электролитов электрическое поле во много раз слабее, чем в дистилляте. Подобные сверхслабые поля не оказывает никакого ощутимого воздействия на биообъекты, находящиеся в объеме воды: для сравнения, подобное силовое воздействие оказывает на электрон молекула воды, находящаяся от него на расстоянии  $10^{100}$  км.



Рис. 5. Слева: подготовка чашек Петри. Справа: исследуемые образцы на одном из электродов высокого напряжения

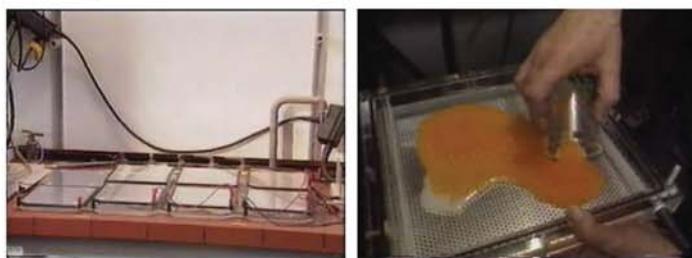


Рис. 6. Слева: экспериментальные установки (аквариумы). Справа: размещение икры в установке для разведения мальков (в днище аквариума находится алюминиевый электрод)

### Учет влияния прочих факторов

**Размеры биообъектов.** Размеры икринок рыбы или семян растений много больше толщины ДЭС, поэтому биообъекты находятся вне действия электрического поля.

**Конвекция.** Толщина ДЭС настолько мала, что процессы конвекции пренебрежимо малы и действует теория пограничного слоя. На границе раствора (вблизи стенок сосуда) действуют т.н. условия прилипания и непроницаемости, поэтому перемещения массы раствора в ДЭС практически отсутствуют.

**Учет объема, занимаемого ионами.** Уравнение состояния электролита с учетом факторов вытеснения ионами молекул воды и конечных размеров ионов, вообще говоря, нелинейное. Однако, как показывают вычислительные эксперименты, данный фактор к новым качественным результатам не приводит и практически не меняет порядка величины толщины ДЭС.

**Степень гидратации** ионов при расчете процессов электро- и массопереноса в слабых электролитах, как правило, не учитывается.

**Водопоглощение плексигласа.** Согласно справочным данным водопоглощение материала полиметилметакрилат за 24 часа составляет 0,35% по массе. При анализе влияния данного фактора целесообразно учесть следующее. Во-первых, можно отметить, что крышка аквариума или чашки Петри (на которой располагался один из электродов) в экспериментах не всегда контактировала с водой, а потому пропитка водой относится преимущественно к одной нижней части аквариума или днищу чашки с образцами биообъектов.

Во-вторых, опыты с растениями были относительно кратковременными (около 3 суток), поэтому водопоглощение не могло иметь значения.

**Токи утечки.** Удельное сопротивление плексигласа составляет  $10^{11}$ - $10^{12}$  Ом·м. Учитывая размеры аквариума (длина 0,315 м, ширина 0,285 м, высота 0,045 м) и интервал применявшихся напряжений 500 В – 50 КВ, сопротивление утечкам составляет  $10^{10}$ - $10^{11}$  Ом, а токи утечки могли быть равными от 0,005 мкА до 5 мкА. Так как в ряде экспериментов электрод на верхней крышке был дополнительно изолирован слоем воздуха, токи утечки должны быть еще меньше.

Также следует отметить, что ранее уже изучалось влияние протекающего в растворе электрического тока и соответствующих электрических полей на водные организмы [11, 12]. В работе [11] исследовалась реакция водных животных к длительному воздействию электрических полей с напряженностью 3-10 В/м, в частности, чувствительность форели (*Salmo Iridens*) и карпа (*Cyprinus carpio*) к электрическому току и содержанию биогенных моноаминов в их тканях в течение различных сезонов года.

Одно из первых исследований влияния гравитации и магнитных полей на биологические системы осуществили Гудман и Хендерсон [12]. Во всех перечисленных работах не было выявлено никаких биофизических аномалий.

**Возможность пробоя.** Согласно справочным данным напряженность пробоя для плексигласа составляет: 20-35 МВ/м. Учитывая, что суммарная толщина диэлектрика составляла порядка 0,01 м, то напряжение пробоя примерно равно 200-350 КВ, что много больше максимального напряжения, применявшегося в экспериментах (50 КВ).

**Поверхностная проводимость.** Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика.

Вода, отличается значительной электропроводимостью, поэтому достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностная электропроводность обычно рассматривается как свойство самого материала.

Относительная влажность является важным фактором, определяющим удельную поверхностную проводимость диэлектрика. При влажности 70% поверхностное сопротивление при неочищенной поверхности (в Ом) составляет 200 МОм для щелочного стекла и плавленого кварца, 1000 Мом для микалекса (к сожалению, для оргстекла соответствующие данные в справочной литературе отсутствуют).

После очистки поверхности сопротивление увеличивается в 1000-10000 раз. Учитывая, что напряженность электростатического поля достигала 1 МВ/м, поверхностный ток мог бы принимать значения до 1 мА. Предположительно, данный фактор не играл значительной роли, так как в его присутствии могло бы произойти короткое замыкание. Также надо учитывать, что, согласно описаниям изобретения, во многих экспериментах электроды были залиты в плексиглас.

*Диффузия протонов* из раствора в диэлектрик. Известно, что протоны способны мигрировать между крупными органическими и неорганическими молекулами (что, например, определяет электропроводность льда). Данный фактор, предположительно, является в эксперименте незначимым, так как время обработки растительных биообъектов было небольшим.

### Вывод

Таким образом, электростатическое поле в объеме воды практически полностью отсутствует, так как экранировано микроскопически тонким слоем ионов в двойном электрическом слое и никоим образом не может влиять на жизнедеятельность организмов. Следовательно, феномен, открытый в лаборатории химического концерна CIBA-GEIGY [9], предположительно, объясняется не влиянием стороннего электростатического поля, а факторами иной, еще не исследованной природы.

Результаты проведенных автором исследований могут также применяться при расчетах электротехнических устройств с перекрывающимися ДЭС, например, суперконденсаторов (ионисторов) [15].

### Литература

1. *Дамаскин Б.В., Петрий О.А.* Электрохимия. М.: Высшая школа, 1987. 295 с.
2. *Третьяк А.Я., Некрасов С.А.* Вопросы практики и теории омагничивания промывочной жидкости // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: сб. / ВНИИОЭНГ. М., 1995. № 12. С. 28-29.
3. *Некрасов С.А.* Биофизическая аномалия, вызванная присутствием стороннего электростатического поля // Научное обозрение, 2012. № 4.
4. *Некрасов С.А.* Моделирование массо- и электропереноса в потоке электролита при воздействии магнитного поля // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. № 2. С. 22-24.
5. *Некрасов С.А.* Ионный перенос в потоке электролита при воздействии магнитного поля // Изв. РАН Электрохимия. 2012. № 12.
6. *Некрасов С.А.* Расчет электростатического поля в конечном объеме водного раствора // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. №1. С. 7-11.
7. *Некрасов С.А.* Расчет электростатического поля в объеме водного раствора // Журнал физической химии (РАН). 2012. Т.86. № 11. С. 1-5.
8. *Nekrasov S.A.* Calculating the Electrostatic Field in the Bulk of an Aqueous Solution // Russian Journal of Physical Chemistry A, 2012. Vol. 86. No. 11, pp. 1730-1733.
9. *Ebner, Guido, Dr., Schuerch, Heinz.* Europaeische Patentanmeldung. Verbessertes Fischzuchtverfahren. Veroeffentlichungsnummer: 0 351 357 A1. Anmeldenummer: 89810461.7. Anmeldetag: 15.06.1989. Prioritaet: 24.06.1988 CH 2429/88. Veroeffentlichungstag der Anmeldung: 17.01.1990. Patentblatt 90/03.
10. Suedwestfunk FS-Information. Baden-Baden. Report-Sendung: Datum: 05.10.1992.
11. Chemical abstracts. Band 95, 1981. P.453. Nr. 165987b, Columbus, Ohio, US; M. VOSYLIENE et al.: "Reaction of aquatic animals to electric fields. 9. Sensitivity of trout and carp to an electric current and content of biogenic monoamines in their tissues during various seasons of the year", & LICHT. TSR MOKSLU AKAD. DARB., SER. C 1981, (3), 109-18.
12. *Goodman, Henderson.* Bioelectromagnetics. 7, 1986, pp. 23-29.
13. *Глинка Н.Л.* Общая химия. Л.: Химия, 1986. 704 с.
14. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 304 с.
15. *Кузнецов В.П.* и др. Пути и перспективы развития и применения конденсаторов с двойным электрическим слоем (ионисторов) // Электронная техника, серия 5. Радиодетали и компоненты, 1991. Вып. 4(85).

## MODELING OF THE ELECTRIC FIELD IN THE VOLUME WITH WATER BETWEEN THE CONDENSER LINES

Robert V. Arutyunyan, Moscow State Technical University named after NE Bauman, Moscow, Russia, [rob57@mail.ru](mailto:rob57@mail.ru)

**Abstract**

Modeling of the electric field in electrolyte solutions can be relevant for electrical systems and electronics, for example, in connection with the widespread use of supercapacitors. Treatment of solutions with magnetic and electric fields is one of the promising areas of applied electrical chemistry. A significant part of the work in this area is mainly concerned with the investigation of the effect of the current flowing in the solution. In the literature, as a rule, the effect of an external magnetic field on a moving solution of electrolyte is investigated, leading to the occurrence of circulating ion currents and a dense ionic current in the solution. double electrical layer (DES). Studies of the effect of an external static electric field on the properties of the electrolyte volume were carried out to a lesser extent. Since the diffuse DES model is insufficient, the calculation of the electric field also takes into account a dense layer of ions (specific adsorption), which corresponds to a more perfect Stern model. A system of equations describing a static electric field and diffusion in a finite volume of an aqueous solution is considered. The electrostatic field was calculated in the volume of distilled and ordinary water. Factors such as the size of bioobjects, convection, the volume occupied by ions, the degree of hydration of ions, water absorption of plexiglas, leakage currents, the possibility of breakdown, surface conductivity, diffusion of protons are taken into account. The obtained results allow to reach the following conclusions: the electrostatic field in the water volume is almost completely absent, as it is screened microscopically by a thin layer of ions in a double electric layer and in no way can affect the vital activity of organisms. Consequently, the phenomenon discovered in the laboratory of the chemical concern CIBA-GEIGY (now Novaartis), presumably, is explained not by the influence of an external electrostatic field, but by factors of another, not yet explored nature. The results of the studies can also be used in the calculation of electrical devices with overlapping DES, for example, supercapacitors (ionistors), as well as in studies of bioreactors.

**Keywords:** electrolyte, static electric field, calculation.

**References**

1. Damaskin B.V., Petriy O.A. (1987). *Electrochemistry*. Moskva: Vyshaja Shkola. (in Russian)
2. Tretyak A.Ya., Nekrasov S.A. (1995). Practice questions and the theory of magnetization of a washing liquid. *Construction of oil and gas wells on land and at sea: Sat. VNIIOENG*. Moscow, no 12, pp. 28-29.
3. Nekrasov S.A. (2012). Biophysical anomaly caused by the presence of an external electrostatic field. *Scientific Review*, no 4.
4. Nekrasov S.A. (2003). Simulation of mass and electrotransport in the electrolyte flow under the action of a magnetic field. *Electromechanics*. no. 2, pp. 22-24.
5. Nekrasov S.A. (2012). Ionic transport in an electrolyte flow under the action of a magnetic field. *Electrochemistry*, no 12.
6. Nekrasov S.A. (2012). Calculation of the electrostatic field in a finite volume of an aqueous solution. *Electromechanics*, no 1, pp. 7-11.
7. Nekrasov S.A. (2012). Calculation of the electrostatic field in the volume of an aqueous solution. *Journal of Physical Chemistry*. Vol. 86. No. 11, p. 15.
8. Nekrasov S.A. (2012). Calculating the Electrostatic Field in the Bulk of an Aqueous Solution. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2012, Vol. 86, no. 11, pp. 1730-1733.
9. Ebner, Guido, Dr., Schuerch, Heinz. Europaeische Patentanmeldung. Verbessertes Fischzuchtverfahren. Veroeffentlichungsnummer: 0 351 357 A1. Anmeldenummer: 89810461.7. Anmeldetag: 06/15/1989. Prioritaet: 24/06/1988 CH 2429/88. Veroeffentlichungstag der Anmeldung: 17.01.1990. Patentblatt 90/03.
10. Suedwestfunk FS-Information. Baden-Baden. Report-Sendung: Datum: 05.10.1992.
11. Chemical abstracts. Band 95, 1981. P.453. Nr. 165987b, Columbus, Ohio, US; M. VOSYLIENE et al. : "Reaction of aquatic animals to electric fields. 9. Sensitivity of trout and carp to an electric current and content of biogenic monoamines in their tissues during various seasons of the year. & LICHT. TSR MOKSLU AKAD. DARB., SER. C 1981, (3), 109-18.
12. Goodman, Henderson (1986). *Bioelectromagnetics*. 7, pp. 23-29.
13. Glinka N.L. (1986). *General chemistry*. Leningrad: Chemistry. (in Russian)
14. Bogoroditsky N.P., Pasyukov V.V., Tareyev B.M. (1985). *Electrotechnical materials*. Leningrad: Energoatomizdat.
15. Kuznetsov V.P. (1991). Ways and perspectives of development and application of capacitors with a double electrical layer (ionistors). *Electronic engineering, series 5. Radio components and components*. Issue. 4 (85).

**Information about author:**

Robert V. Arutyunyan, Moscow State Technical University named after NE Bauman, Ph.D., associate professor of the Department of Mathematical Modeling, Moscow, Russia