

ОСНОВЫ НАНОМЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

д.т.н. И.Н.Медведев
ООО «АКВАМИН®» РФ

Термин – «**наномембранная технология**» (NM-технология) объединяет понятие электрохимических процессов, протекающих в гетерогенных системах: твёрдое тело + электролит, где на границе раздела фаз самопроизвольно возникает третья нанофаза толщиной $10 - 100 \text{ \AA}$, названная двойным электрическим слоем ($\delta - DES$).

Идея управляемого $\delta - DES$ созрела из ранее наблюдаемых аномальных автоколебаний электрохимических систем, что вызвало необходимость создания NM-модели $\delta - DES$ типа осциллятора с морфологией **жидкого кристалла (LC)**, где работа LC-осциллятора достигается за счёт энергии **резонатора** электромагнитного поля

Установлена закономерность управления LC, как функция энергии электромагнитного поля. Управление LC энергией электромагнитного поля позволило повысить к.п.д. NM-процессов, в том числе создать резонансный процесс селективного хроматографического разделения полиэлектролита по массе, валентности и знаку заряда.

Применение электромагнитной NM-технологии в инженерной практике позволяет создать энергосберегающие, экологически чистые процессы и аппараты для гидрометаллургии, электрохимии, биологии и других отраслях науки и техники.

The basics of Nanomembrane Technology

I.N.Medvedev

Doctor of Sciences (Technology)

«AQUAMIN®» Co. Ltd. RU

The term nanomembrane technology (NM-technology) implies electrochemical processes taking place in heterogeneous systems: solid body+electrolyte, where at the phase boundary phases, there spontaneously occurs the third nanophase with a thickness of $10-100 \text{ \AA}$, named a double electric layer ($\delta - DES$).

The idea of a controlled $\delta - DES$ has come into being from the earlier observed abnormal self-oscillations of electrochemical systems the generated a need for a NM-model of $\delta - DES$ type for oscillator with the morphology of a liquid crystal (LC), where to control the latter a for an oscillator with the morphology of a liquid crystal (LC), where to control the latter a resonator-electromagnetic field is used.

The regularity of LC control as a function of electromagnetic field energy has been established, which allowed improving the efficiency of NM processes and also creating a resonant process for selective polyelectrolyte chromatograph division by weight, valency and the sign of a charge.

The application of the electromagnetic NM-technology in engineering practice allows creating energy-saving, ecologically benign processes and devices for hydrometallurgy, electrochemistry, biology and other branches of science and engineering.

1. Двойной электрический слой ($\delta - DES$)

Отправным пунктом NM-модели служит представление о наличии трёхфазной гетерогенной системе: лёд + пары воды + вода, которая самопроизвольно образует четвёртую **нанофазу (тройная точка)**, в виде двойного электрического слоя ($\delta - DES$).

В условиях межфазного равновесия, физические параметры **нанофазы** оцениваются в пределах:

$\delta - DES \approx 10 - 100 \text{ \AA}$, толщина

$E = 10^6 - 10^7$ в/см; напряжённость электрического поля

$\tau = 10^{-3} - 10^{-14}$ сек - время релаксации,
 $D = 7,0$ - диэлектрическая проницаемость
 m - масса $\delta - DES$ (факультатив).

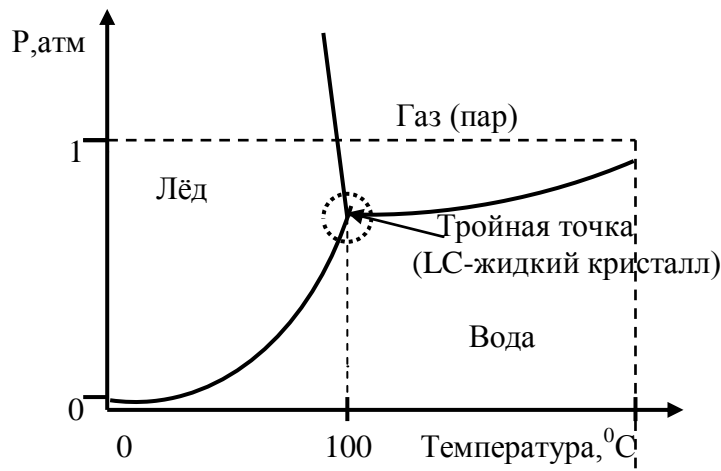


Рис.1.1. Четырёхфазная гетерогенная система: лёд+пар+вода+ LC.

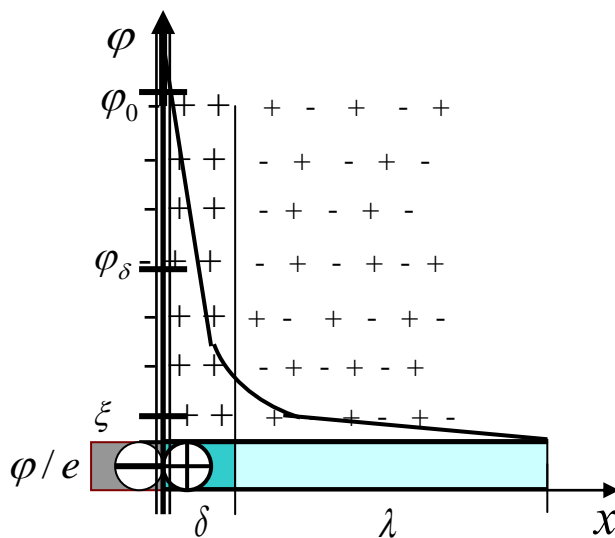


Рис.1.2. Трёхфазная NM-система: твёрдое тело + электролит: λ - диффузный слой, φ - общий потенциал, φ_0 - нулевой потенциал, φ_δ - потенциал плотного слоя, ξ - электрокинетический потенциал.

2. Морфология двойного электрического слоя ($\delta - DES$).

Природу происхождения электрического заряда $\delta - DES$ можно объяснить с позиции морфологии, где $\delta - DES$ (нанофаза) можно представить в виде объёмного структурного образования типа **жидкого кристалла** (LC), где единичная молекула **гексомера** воды в декартовой системе координат (xoy), дополнительно сшита перекрёстными водородными мостиками. По вектору оси-z гексомеры образуют **жидкие кристаллы** (LC) в виде дискообразных столбиков - гексогенаэдр (**домены**) [2].

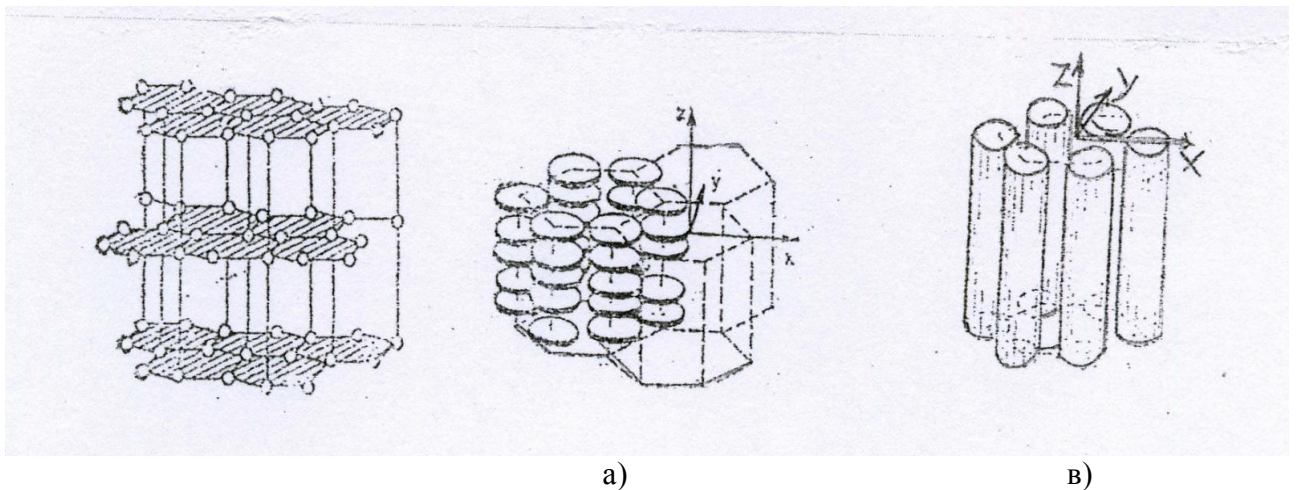


Рис.2.1. Кристаллическая решётка жидкого кристалла (LC) воды: а) плоскопараллельная структура LC (дискотик), в) капиллярная структура LC (смектик).

С позиции механики LC является частично твёрдой структурой, где параллельное множество столбиков (типа-щётка), ориентированных перпендикулярно к вектору внешней силы, обладают свойствами твёрдого упругого тела $\vec{F}_z = -kx$ (закон Гука), а со стороны вектора тангенциальной силы \vec{F}_{xoy} , ведут себя как вязкая жидкость. Если оценить работу $\vec{F}_{xoy} \approx 5,0-20,0$ кДж/моль через теплоту гидратации, то очевидно, что работа вектора перемешивания жидкого тела на много меньше $\vec{F}_{xoy} \ll \vec{F}_z$ работы вектора модуля упругих сил, т.е. требует совсем небольших затрат энергии.

На основании анализа морфологии LC, можно сделать выводы о возможности управления кинетикой LC путём тангенциального «сцепления» двух сил - вектора $\vec{F}_z(t)$ с вектором $-\vec{F}_{xoy}(t)$, что позволит NM-технологии выйти на новый технический и энергетический уровень.

Толщина LC, как расстояние центра тяжести электрического заряда до границы λ -диффузного слоя рассчитывают по уравнению [1]:

$$LC = \sqrt{\frac{DRT}{8\pi z^2 F^2}} \quad (1.1.)$$

где, $D = 81$ – диэлектрическая проницаемость воды, $R=8,32 \times 10^7$, $T=291K^0$, c -концентрация электролита λ – диффузного слоя, z – расстояние границы скольжения от δ до λ , $F=2,9 \times 10^{14}$ э.е. - число Фарадея.

Расчётная толщина LC, как функция концентрации электролита для I-I валентного электролита (KCl) показана в Табл.1.

Таблица 1.

c , г-экв/см ³	LC, мк
$0,9 \times 10^{-10}$ (вода Кольрауша), $\chi=3,8 \times 10^{-8}$ ом ⁻¹ см ⁻¹	1,01
$1,0 \times 10^{-6}$	0,0096
$1,0 \times 10^{-4}$	0,00096

Из данных Табл.1. можно сделать вывод, что с ростом концентрации электролита в λ – диффузной фазе происходит сильное сжатие толщины LC/

3. Выражение энергии LC-осциллятора.

Если с течением времени энергетические параметры LC не меняют своих численных значений, то состояние системы считается равновесной или истинно стационарной.

Если в дополнение к этому энергетическому состоянию нет никаких внешних энергетических потоков (подпитка), тогда LC бесконечно долго находится в состоянии энергетического равновесия (потенциальная «яма») и поэтому самостоятельно из равновесного стационарного состояния выйти не может [3].

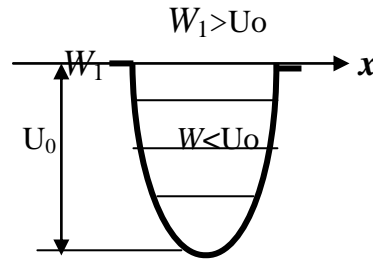


Рис.3.1. Графическое изображение энергии LC в потенциальной «яме».

На Рис.3.1. показана LC система с минимальной энергией $W = mah \leq U_0$ находится в равновесии и не может выйти из потенциальной «ямы». Однако, равновесные системы обратимы, т.е. систему LC можно «поднять» из потенциальной «ямы» приложив воздействие внешнего источника энергии той же или большей величины. Вероятность поднять LC из потенциальной «ямы» возрастает пропорционально энергии $W_1 > U_0$, вынуждающей внешней силе, максимальная величина которой равна:

$$W_1 \geq mah = mA^2 \omega_0^2 / 2 \quad (3.1.)$$

где, m – масса LC, a – ускорение, A – амплитуда, ω_0 – собственная циклическая частота колебания LC; h и H – минимальная и максимальная высота энергии потенциальной «ямы».

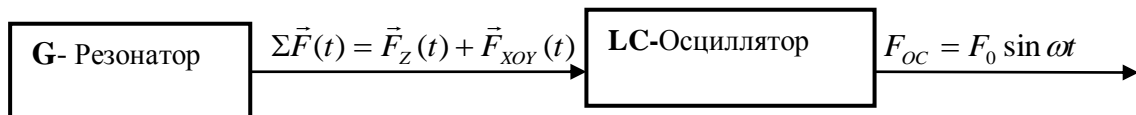


Рис.3.2. Схема вынужденного колебания LC-Осциллятора, G –Резонатор.

4. Энергия электромагнитного поля.

Вынужденные колебания LC-осциллятора можно осуществить подводом различной кинетической энергией: механическая, электрическая, магнитная, химическая, тепловая и др. Однако, учитывая наноразмеры LC, его электрическую природу, для вынужденного колебания LC, предпочтительно применить энергию электромагнитного поля (ЕМР). При прохождении через границу раздела двух плоско-параллельных *изотропных* фаз: LC (проводник — ϵ) + мембрана (диэлектрик — μ), ЕМР образует вектор энергии \dot{P}_z (Рис.4.1)..

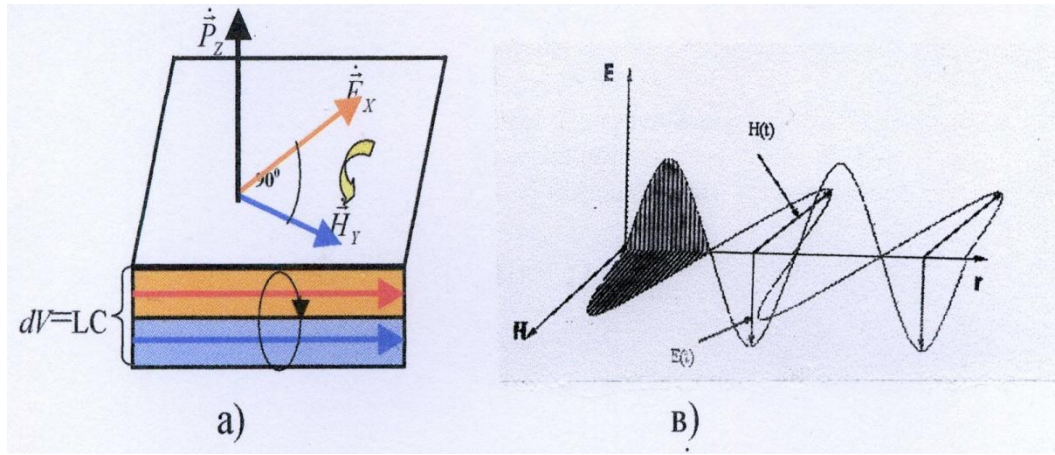


Рис.4.1. Электромагнитное поле двух изотропных фаз: мембрана+LC. а) \dot{P}_z – вектор полной мгновенной энергии; \dot{E}_x – вектор напряженности электрического поля, \dot{H}_y – вектор напряженности магнитного поля; в) Плоская электромагнитная волна.

Полная мгновенная энергия ЕМР, канализованная в LC-осциллятора определяется

уравнением Умова-Пойтинга [4]:

$$\dot{P}_z = [\dot{E}_x \dot{H}_y] \quad (4.1.)$$

где, \dot{P}_z - полная мгновенная энергия вектора ЕМР по направлению оси-z, образована двумя «сцепленными» в плоскости осей-*хоу* под углом 90° - вектором \dot{E}_x напряженности электрического поля и \dot{H}_y -вектором напряженности магнитного поля;

Мощность ЕМР в единице dV объема LC-осциллятора, в единицу времени,

ограниченной поверхностью S , будет равна:

$$-\oint_S PdS = \oint_V \gamma \dot{E}_x^2 dV + \oint_V \partial / \partial t (\epsilon \dot{E}_x^2 / 2 + \mu \dot{H}_y^2 / 2) dV \quad (4.2.)$$

где, левая часть $\oint_S \gamma \dot{E}_x^2 dV$ уравнения (4.2.)-энергия ЕМР *доставляемая* резонатором в

dV объём LC-осциллятора,

правая часть $\oint_V \partial / \partial t (\epsilon \dot{E}_x^2 / 2 + \mu \dot{H}_y^2 / 2) dV$ -энергия *расходуемая* в dV объёме LC-осциллятора, в единицу времени;

Таким образом, мы имеем LC-осциллятор, где энергия плоской электромагнитной волны образована двумя «сцепленными» под $\perp 90^\circ$ вектором \dot{E}_x и вектором \dot{H}_y .

Если представить энергию ЕМР $\dot{P}_z = [\dot{E}_x \dot{H}_y]$ замкнутым контуром, где фазированные векторы $rot \dot{E}_x = E_0 \sin \omega t$ и $rot \dot{H}_y = H_0 \sin \omega t$ «сцеплены» друг с другом, тогда энергия $rot \dot{E}_x$ образует \dot{B} -вектор магнитной индукции, что приводит к вихревой конвекции и увеличению кинетики массопереноса LC-осциллятора [8-10].

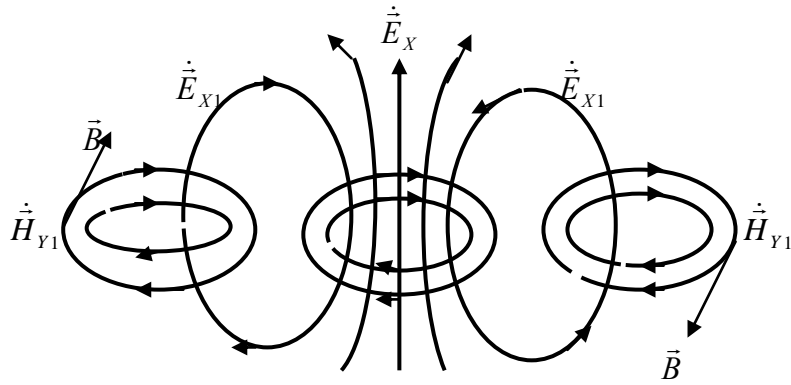


Рис.4.2. Сцепленный ротор электромагнитного поля правого винта.



Рис.4.3. Образование ротора вихревой конвекции LC-осциллятора в виде поверхностного наномембранного слоя с частотой релаксации вихрей от 10 до 30 сек, полученная методом лазерной интерферометрии [8].

5. Кинетика электромагнитного поля капилляра

Рассмотрим случай прохождения электромагнитного поля (ЕМР) через *анизотропную* среду, где фаза диэлектрика мембраны пронизана сквозной цилиндрической порой (капилляр) конечной Δl -длины, заполненна фазой токопроводящего электролита (Рис.5.1.).

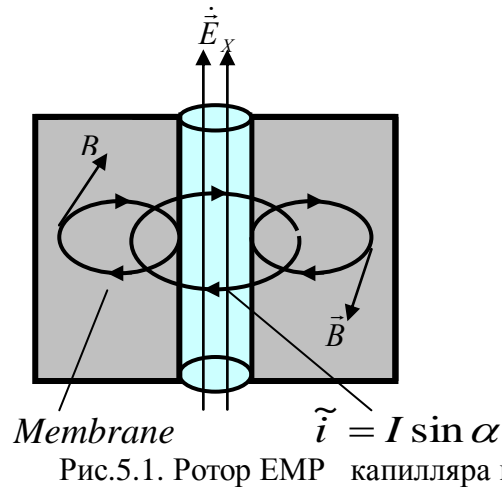


Рис.5.1. Ротор ЕМР капилляра мембраны.

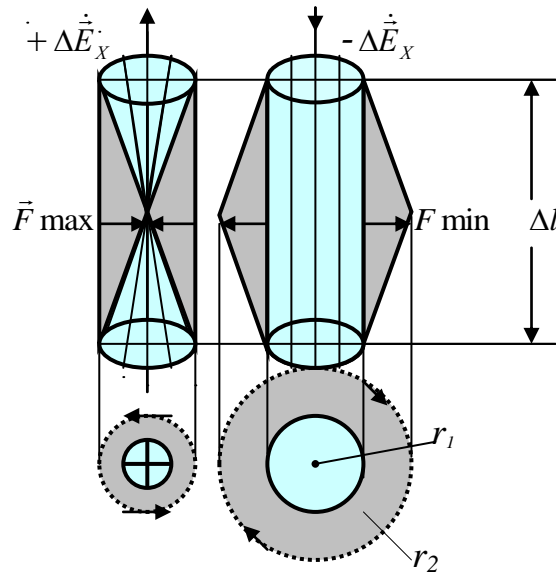


Рис.5.2. Магнитное поле внутри капилляра Δl ; r_1 – проводник (электролит), r_2 – диэлектрик (мембрана), $\vec{F} \max, \vec{F} \min$ – сила механического действия магнитной индукции, \oplus – капилляр «закрыт», \ominus – капилляр «открыт».

Вектор- \vec{H}_y магнитного поля определяет силовое механическое действие в диэлектрике Δl -капилляра (сила Ампера):

$$\vec{F} = \int_l \vec{i} \vec{B} \Delta l \sin \alpha \quad (5.1.)$$

где, \vec{i} - переменный электрический ток, $\vec{B} = \mu \vec{i} / 2\pi r_2$ - вектор магнитной индукции, Δl - длина капилляра и синус угла α между направлением тока и вектором магнитной индукции; μ — магнитная проницаемость диэлектрика (мембрана); r_2 -радиус диэлектрика.

Если максимальная величина механической силы равна $\vec{F} = \vec{F} \max$, тогда при условии $\sin \alpha = 1$, капилляр Δl -«закрыт», если минимальная величина механической силы равна $\vec{F} = \vec{F} \min$, тогда при условии $\sin \alpha = 0$, капилляр Δl -«открыт».

Соответственно, движение вектора потока электролита через капилляр: «вверх» ($+\Delta\dot{E}_x \uparrow$), «вниз» ($-\Delta\dot{E}_x \downarrow$) (Рис.5.2.).

6. Резонанс LC-осциллятора.

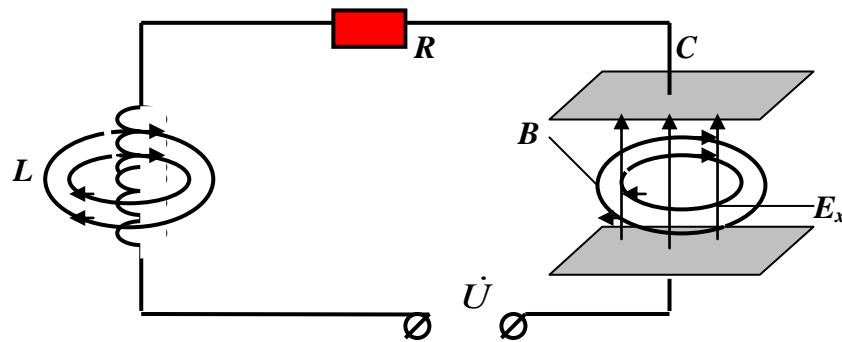


Рис.6.1. Схема колебательного контура RCL.

На основании электромагнитной модели LC-осциллятора можно построить эквивалентную модель в виде колебательного контура: RCL .

Мгновенная мощность LC-осциллятора с элементами последовательной цепи RLC равна:

$$\tilde{S} = \tilde{U} \tilde{I} \sin \varphi = 1/2 \dot{U}_0 \tilde{I}_0 Z \quad (6.1.)$$

где, $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – импеданс, R – активное сопротивление, $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление катушки, $X_C = 1/\omega C$ – индуктивное сопротивление конденсатора,

Отношение энергии, запасенной реактивными элементами контура (CL), к энергии (R) омических (резистивных) потерь за один период, в котором все три элемента включены последовательно RCL, (Q – добротность) вычисляются:

$$Q = 1/R \sqrt{L/C} \quad (6.2.)$$

Для амплитудно-частотных характеристик параллельного колебательного контура, в котором индуктивность и ёмкость включены параллельно, добротность равна:

$$Q = R\sqrt{C/L} = W_L + W_C = L\tilde{I}^2/2 + C\dot{U}^2/2 \quad (6.3.)$$

Явление **резонанса** LC-осциллятора возможно путём фазирования ω_0 – собственной

частоты колебания с ω — вынужденной частотой колебания.

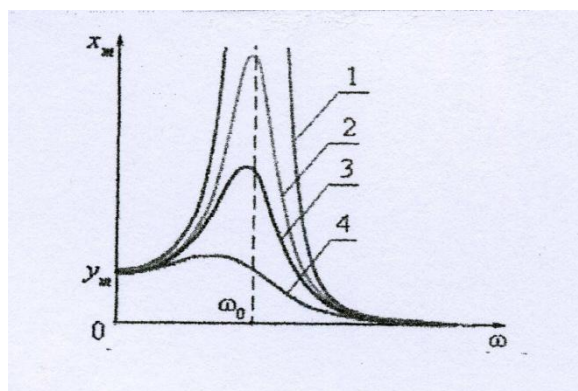


Рис.6.2. Резонансные кривые LC-осциллятора при различных уровнях добротности: 1. осциллятор без трения; 2,3,4- осциллятор с различной добротностью

Когда величины реактивных сопротивлений катушки $X_L = \omega L$ и конденсатора $X_C = 1/\omega C$ равны по модулю. Величину собственной резонансной частоты колебания LC-осциллятора рассчитывают по формуле $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Частотный резонанс при условии $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ должен привести к увеличению кинетики массопереноса за счёт интенсивной конвекционной составляющей LC-осциллятора

Кроме ожидаемого роста Q — добротности, есть вероятность процесса селективного **резонансного** разделения ионов полиэлектролита по: массе, валентности и знаку заряда, что требует экспериментальной оценки.

7. Экспериментальная часть

7.1. Определение ёмкость жидкого кристалла (LC).

Исследовалась ёмкость LC как функция $C=f(c,f)$ на границе раздела фаз: мембрана + электролит. Ёмкость LC определялась на концентрациях электролита: 0,01M; 0,1M; 1,0M NaCl в двухкамерной электродиализной ячейке (EDS), изготовленной из фторопласта с электродами из платины (Pt), с перегородкой из пористой полимерной мембраны,

Ячейка включалась в мостовую схему с возможностью балансирования моста на частотах переменного электрического тока в пределах $f=40\text{Hz} - 50\text{kHz}$.

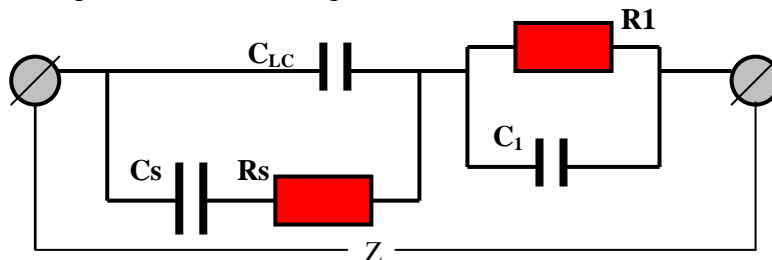


Рис.7.1. Электрическая эквивалентная схема ячейки: C_S — ёмкость поляризационная, C_1 — ёмкость электролита, C_{LC} — ёмкость LC-осциллятора, C_S -поляризационная, R_S — сопротивление поляризационное, R_1 — сопротивление электролита, Z — импеданс ячейки.

Значения величины ёмкости LC устанавливались по отрезку отсекаемому прямой построенной в координатах $C_E^{-1} - (\omega R_1)^2$. Были получены графики показанные на Рис.7.2. Для каждой концентрации электролита, нижняя линия в семействе прямых отсекает на ординате графика сумму ёмкостей C_Σ ячейки.

Емкость мембраны вычислялась по формуле:

$$C_{LC} = C_{\Sigma} - C_E \quad (7.1.)$$

Были получены графики, семейства прямых: 0,01М, 0,1М и 1,0М NaCL, где нижняя линия для каждой концентраций электролита, отсекают на ординате графика ёмкости C_{LC} мембраны, соответственно: $+0,4mkF^{-1}$; $+0,3mkF^{-1}$; $-0,05mkF^{-1}$.

Было установлен, что с повышением концентрации раствора NaCL электролита происходит снижение емкости C_{LC} , что объясняется «сжатием» толщины LC.

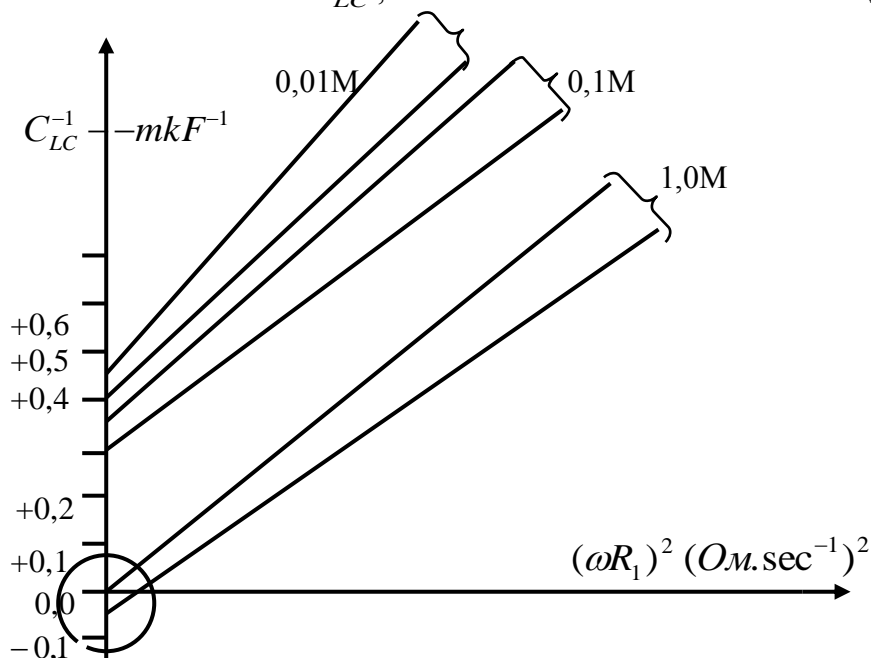


Рис.7.2. Емкости LC в зависимости от концентрации электролита.

Для раствора концентрации электролита 1,0М NaCL, нижняя линия отсекает на ординате графика отрезок отрицательный ёмкости, что связано с появлением вихревой конвекции LC-осциллятора.

7.2. Определение собственной частоты колебания LC-осциллятора.

Частоту $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, [Hz] собственных колебаний LC определяли путем релаксации LC мембраны ударным однополярным электрическим импульсом (цуг), различной $q = \tau/\tau_H$ -скважностью в электромембранной ячейке (EDS), заполненной раствором NaCL 0,01-1,0М.

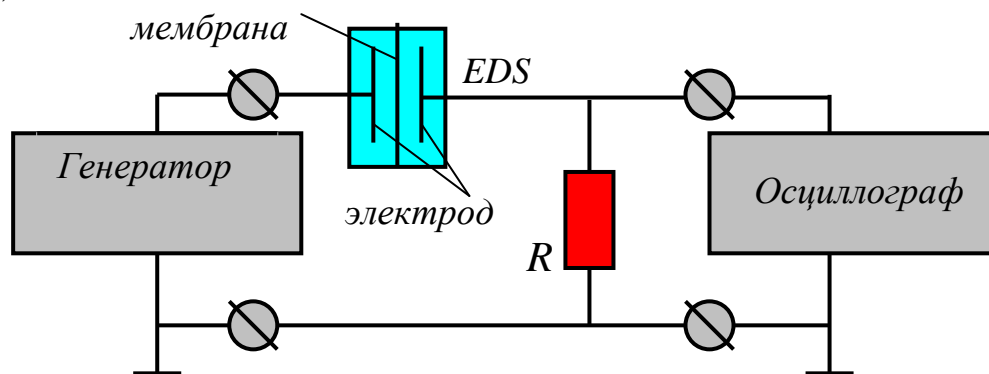


Рис.7.3. Схема подключения электродиализной ячейки (EDS).

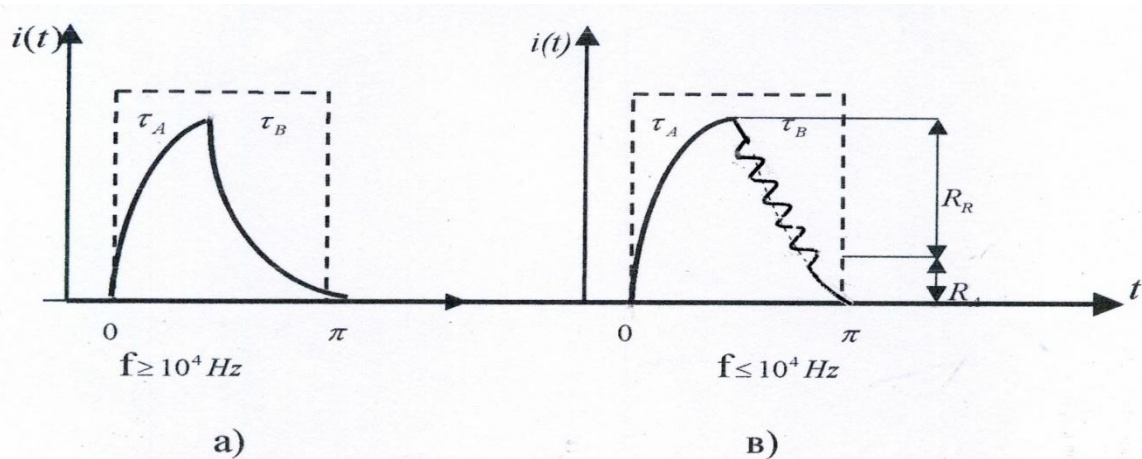


Рис.7.4.. Форма импульса тока $I(t)$ при прохождении через мембрану EDS .
 В результате импеданса цепи $Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$, при прохождении импульса тока через мембрану, происходит искажение прямоугольного импульса, форма которого фиксировалась двухлучевым осциллографом на сопротивлении 1кОм. В результате релаксации и ослабления электрического заряда $\tau_A(t)$ – передний фронт импульса растет по выпуклой экспоненте:

$$i = I(1 - e^{-t/RC}), \quad (7.2.)$$

где, t – постоянная времени цепи RC – прямоугольного импульса.

В результате полного *электрического заряда* $LC = U_m$, передний фронт импульса – $\tau_A(t)$ обрывается и LC – мембраны сам становится источником кинетической энергии, который совершать работу $\tau_H(t)$ – *электрического разряда* в виде вогнутой кривой, которую можно выразить через показательную функцию:

$$i = Ie^{bt} \quad (7.3.)$$

...В процессе релаксации LC установлена зависимость $\tau_H(t) = f(f, c)$, как функция частоты колебания генератора и концентрации солей электролита. Установлено, что на относительно высоких частотах импульса ($f \geq 10^4 \text{ Hz}$) и выше, фиксировались простые переходные процессы электрического тока - форма импульсов искажалась стандартно (Рис.7.4а.).

При воздействии импульсов низкой частоты и ниже ($f \leq 10^4 \text{ Hz}$), наблюдаются процессы автоколебания электрического разряда $\tau_H(t) = I \cos \omega t$, что объясняется явлением резонанса электромагнитного поля LC –осциллятора (Рис.7.4в).

7.3. Селективное осаждение металлов электролита.

Исследования селективного осаждению металлов электролита (гальваника) исследовалась путем электромагнитного резонанса LC- осциллятора. Генератор ЕМР подключали к электролитической ванне по схеме колебательного контура RLC.

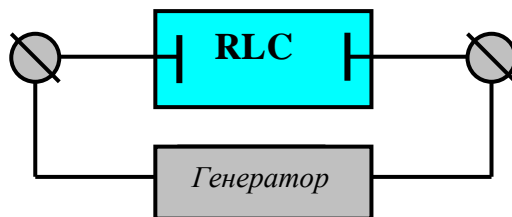


Рис.7.5.Эквивалентная схема колебательного контура RCL.

Количество и качество резонансного покрытия металлов из водных растворов солей: цинк (Zn), никель (Ni), железо (Fe), медь (Cu), серебро (Ag), свинец (Pb), оценивалась по физико-механическим свойствам (твёрдость, мелкозернистость и др.). Исследования показали, что наилучшие физико-механические свойства катодного металла получены на соответствующих селективных для каждого элемента резонансных частотах. Численное значение резонансных частот подчиняется строгой закономерности по формуле:

$$f_R = K/nA$$

где, K – предельная резонансная частота протона водорода, n – валентность осаждаемого элемента, A – атомный вес осаждаемого элемента.

Экспериментальные резонансные частоты приведены в Табл. 2.

Элемент	Валентность	Атомная масса, а.е.м	Резонансная частота, Hz	Соль
Pb	2	207,2	232,9	PbSO ₄
Pb	4	207,2	116,5	Pb(C ₂ H ₅) ₄
Ni	2	58,7	882,0	NiSO ₄
Fe	2	55,84	864,2	FeSO ₄
Cu	2	63,54	758,9	CuSO ₄
Cd	2	112,4	429,3	CdCL ₂
Ag	1	107,87	886,5	AgNO ₃
Zn	2	118,69	566,1	ZnCL ₂

Толщина покрытия осажденного металла почти прямо пропорциональна времени (3,2 мкм -10 minute; 5,5 мкм-15 minute; 6,2 мкм-20 minute и т.д.), что говорит возможности эффективного промышленного применения резонансной технологии для гидрометаллургии и гальваники

7.4. Селективное разделение ионов полиэлектролита.

Возможность мембранного разделения полиэлектролитов, путём селективного концентрирования электролита проводилось на трёх камерном электродиализном аппарате. Разделение полиэлектролита проводилось в диапазоне частот $f_0 = 10^1 - 10^4$ Hz, при плотности электрического тока $(5 - 10)10^{-4}$ A/cm² и индукции магнитного поля $75-220 \times 10^{-4}$ Ts.

Таблица 3.

Экспериментальные данные по разделению ионов

Система ионов	Частота, f, Hz	Концентрация ионов в электролите, моль				Коэффициент разделения, K
		Ca ²⁺	Na ⁺	OH ⁻	CL ⁻	
Ca ²⁺ /Na ⁺	0	<i>Постоянный ток</i>				10 ^{-0,4}
		10 ^{1,2}	10 ^{0,3}	-	-	
OH ⁻ /CL ⁻	0	-	-	10 ^{5,1}	10 ^{1,2}	10 ^{-3,9}
		<i>Электромагнитное поле</i>				
Ca ²⁺ /Na ⁺	0,1	0	10 ^{0,4}	-	-	Полное
		0,5	-	-	0	

где, $K = (C_1 / C_2) / (C_1^1 / C_2^1)$ – коэффициент разделения.

Резонанс LC мембраны для селективного разделения ионов проводили на трехкамерном непроточном растворе полиэлектролита $(Li^+ + K^+)CL^-$ концентрацией 0,005 Моль/л аппарате заполненного схема которого показана на Рис.7.3.

На клеммы электродов аппарата подавали энергию генератора с регулируемой частотой импульса.

Табл. 4.

Энергия	Мощность, wt/ht	Частота, $f Hz$	Коэффициент разделения	$\varphi\%$ выхода Li^+
Постоянный электрический ток (DC)	32,0	0,0	2,9	15,2
Электромагнитное поле (EMF)	18,4	50,0	2,3	18,3
« - »	20,0	1000,0	3,5	22,8
« - » резонанс	12,0	500,0	161,0	99,7

На основании экспериментальных данных Табл.4 видно, что процесс селективного переноса иона лития через биологическую мембрану из бинарного $(Li^+ + K^+)CL$ раствора, происходит под действием энергии электромагнитного поля, при резонансной частоте $f_p=500 Hz$.

Выводы: Установлено:

- 1) -Что на границе раздела фаз: мембрана, (электрод)+электролит, всегда присутствует электрический заряд ($\delta - DES$), как следствие материальной нанофазы (мезофаза) с морфологией жидкого кристалла (LC).
- 2) -Масса LC- фазы есть функция концентрации λ – диффузной фазы электролита.
- 3) -Энергия электромагнитного поля (EMF) внешнего источника всегда индуцирует ротор вихревой конвекции LC-осциллятора (силы Лоренца), что приводит к значительному росту к.п.д. ($\approx 80 - 90\%$) мембранного массопереноса процессов: электролиз, электроосмос, реверсосмос, биоосмос и другие.
- 4) -Управление резонансом EMF позволило создать энергосберегающий, экологичный мембранный процесс хроматографического разделения ионов полиэлектролита по массе, валентности и знаку заряда для гидрометаллургии, обессоливания воды и других промышленных отраслей науки и техники.

Список литературы

- 1.Медведев И.Н., а.с.СССР,№139884,В01D13/02,1988; №1507413,А1,В01D13|02,1989; Патенты: WO 91/04782,1991; PCT/GV 93/00675, 1993; GB 2265633,А,1993; Espanola P9902681; USA 5,589,050,1996.
2. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы –М.: Мир, 1980. 34 с.
3. Большой Энциклопедический Словарь, Физика. М.,1998. 581 с.
- 4.Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Изд.Высшая школа, 1978.
- 5.Брикман В.Д., Неволин В.Г. Параметрическое возбуждение поверхности МГД волн в скрещенных электрическом и магнитном полях.- Тезисы X Рижского совещ.,1981.
6. Гак Е.З. Магнитокинетические явления в водных растворах электролитов. Электрохимия. 1976,т.12,№5,Деп.В ВИНТИ, №3511-75.

7. Шарьгин А.П., Даниэлян Г.Л., Алимова Р.З. О действии магнитного поля на характеристики капиллярной ртутно-электролитической ячейки. Электрохимия, 1979, т.11, №10, с.1478-1481.
8. Гак М.З. Лабораторные исследования автоколебаний в системе четырёх вихрей. -Изв.АН СССР. ФАО, 1981, т.17, №2, с.209-213.
9. Блюменфельд Л.А., Зацепина Г.Н., Позин Е.Я., Тульский С.В. Исследование влияния магнитного поля на пространственное распределение электропроводности воды и водных растворов электролитов, устанавливающееся в процессе электролиза. Ж.физической химии, т.XLV, №8, 1972. с.2073-2077.
10. Васильева В.И., Шапошник В.А., Григорчук О.В. и др. Лазерная интерферометрия в исследовании кинетики электролиза // Электрохимия. 2002. т.38, №8, с.949-955.
11. Козадерова О.А. Шапошник В.А., Шапошник Д.А. Колебательная неустойчивость концентрационного поля в сопряженных секциях концентрирования и обессоливания при интенсивных режимах электролиза, ГОУ ВПО «ВГУ» 2009, с.345-353.