

А.В. Редьков благодарит за поддержку Совет по грантам Президента РФ (проект МК-1574.2019.2).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.A. Manenkov, A.M. Prokhorov, Laser-induced damage in solids, Physics-Uspekhi 29 (1986) 104.
2. W.L. Chan, E. Chason, Making waves: kinetic processes controlling surface evolution during low energy ion sputtering, Journal of Applied Physics 101 (2007) 121301.
3. K. Nordlund, J. Keinonen, M. Ghaly, R.S. Averbach, Recoils, flows and explosions: surface damage mechanisms in metals and semiconductors during 50 eV–50 keV ion bombardment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 148 (1999) 74.
4. A.V. Redkov, A.V. Osipov, S.A. Kukushkin, Evolution of crystal morphology under flow of low-energy particles: vacancy mechanism, Materials Physics and Mechanics 29 (2016) 82-92

#### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ГИБРИДНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ СТРУКТУРАХ

#### PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF ENERGY STORAGE IN HYBRID CAPACITOR STRUCTURES

**В.В.Слепцов, Д.Ю.Кукушкин, А.О.Дителева, / anna.diteleva@mail.ru, Чжо Зо Лвин**

**V.V.Sleptsov, D.Yu.Kukushkin, A.O.Diteleva, Jo Zo Alvin**

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

*В данной статье рассматриваются механизмы накопления энергии в системе с последующим ее преобразованием в электрическую энергию и теоретическое осмысление процессов, позволяющих подойти к созданию накопителей электрической энергии со значительно более высокой энергоемкостью, чем существующие в настоящее время (250 Вт\*ч/кг и выше).*

*This article discusses the mechanisms of energy storage in the system with its subsequent conversion to electrical energy and theoretical understanding of the processes that allow to approach the creation of electric energy storage with a significantly higher energy intensity than currently existing ones (250 W\*h/kg and higher).*

**Ключевые слова:** *Гибридные источники питания сверхъёмкие конденсаторные структуры, химические источники тока, конденсаторы с псевдоемкостью, энергоёмкость.*

**Keywords:** *hybrid power supplies ultra-high-capacity capacitor structures, chemical current sources, capacitors with pseudo-capacity, energy intensity.*

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной необходимостью стало вести наблюдение за возобновляемыми источниками энергии, такими как солнце, ветер, геотермальные источники, океан и

биомассы в качестве устойчивой, экономически эффективной и экологически чистой альтернативы традиционным источникам энергии. Однако, в создании и эксплуатации возобновляемых источников энергии (ВИЭ) остаются нерешенными некоторые задачи, одной из которых является хранение электроэнергии в период от максимальной выработки до максимальной отдачи потребителям. Сегодня решением задачи накопления и хранения электроэнергии является создание гибридных источников питания

Гибридные источники питания (ГИП) сочетают в себе два и более источников питания с различными характеристиками. ГИП на основе химических источников тока (ХИТ) и сверхъёмких конденсаторных структур (СКС) сочетают в себе преимущества, присущие им по отдельности. ХИТ присущи высокая удельная энергия, низкая удельная мощность, длительное время зарядки, короткий циклический ресурс, низкий уровень саморазряда и относительно низкая цена за ватт-час. С другой стороны, СКС присущи низкая удельная энергия, высокая удельная мощность, короткое время зарядки, длительный циклический ресурс, высокий уровень саморазряда и высокая цена за ватт-час. Таким образом, ГИП на основе ХИТ и СКС могут использовать взаимодополняющие свойства этих источников энергии.

В этой статье исследованы механизмы накопления энергии в системе с последующим преобразованием её в электрическую энергию и теоретическое осмысление протекающих процессов позволяющий подойти к созданию аккумуляторов электрической энергии, с существенно большей энергоёмкостью, чем существующие в настоящее время (250Вт·час/кг и выше).

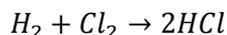
## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

### Системы, в которых протекают химические реакции

В электрохимии энергия химической реакции проявляется в форме электрической энергии, а при химических процессах в форме тепла. Это означает, что переход электрона с одного электрического уровня на другой энергетический уровень в результате прохождения химической реакции проявляется либо в форме электрической энергии, либо в форме тепла. Чтобы происходил электрохимический процесс необходимо создать условия для его протекания.

Получение или затрата электрической энергии происходит в результате направленного прохождения электронов по определенному пути. При электрохимической реакции прямой контакт между реагирующими частицами заменяется контактом каждого из его участников с электродом.

Рассмотрим это на примере реакции окислительно-восстановительного взаимодействия газообразного водорода и хлора с образованием HCl, проведенной в гомогенных условиях [1-2].



Изменение изобарно-изотермического потенциала Гиббса этой реакции может быть записано:

$$\Delta G_{\text{х.з.}} = \sum \Delta \mu_{i(\text{конечное})} - \sum \Delta \mu_{i(\text{исходное})}, \quad (1)$$

где  $\mu_{i(\text{конечное})}$  – химический потенциал продуктов реакции;

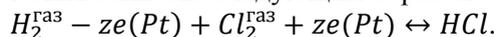
$\mu_{i(\text{исходное})}$  – химический потенциал исходных веществ.

Второй вариант может быть реализован в виде электрохимического процесса в топливном элементе.

Для электрохимического процесса необходимо обеспечить пространственное разделение участников реакции. Кроме того, электроны должны отрываться от одного участника реакции (H) и по одному общему пути переходить к другому участнику реакции (Cl). Это достигается за счет того, что два платиновых электрода помещаются в раствор HCl, а один

из электродов омывается газообразным водородом, другой – хлором. В обоих электродах по внешней цепи протекает электрический ток.

Суммарная реакция может быть записана следующим образом:



Изменение потенциала Гиббса в этом случае записывается следующим образом:

$$\Delta G_{x.p.} = 2\mu HCl - \mu H_2 - \mu Cl_2 + Z\mu e(Pt_1) - Z\mu e(Pt_2) \quad (2)$$

Химический потенциал электронов металла можно выразить через работу выхода электрона и скачок потенциала электрического на границе раздела сред [1-2]:

$$\mu e = A_e + e\chi \quad (3)$$

где  $\mu e$  – химический потенциал электронов;

$A_e$  – работа выхода электрона;

$\chi$  – скачок потенциала на платиновом электроде.

Используя уравнения (2) и (3), а также условие, что работа выхода электронов в среднем величина постоянная, можно уравнение (2) преобразовать к следующему виду:

$$\Delta G_{x.p.} = \sum n_i \mu_i + ze(xPt_1 - xPt_2) = \sum n_i \mu_i + zee \quad (4)$$

где  $\varepsilon = xPt_1 - xPt_2$  – измеряемая в эксперименте разность скачков потенциалов на платиновых электродах.

Уравнение (4) позволяет сделать вывод, что в обратимых процессах вся химическая энергия превращается в электрическую.

Рассматривая природу и механизм действия химического потенциала большинство отечественных и зарубежных исследователей связывают его с эффектами поляризации [3-5].

В работе [1-2] показано, что термодинамический и электростатический учет поляризационных взаимодействий частиц в системе приводят к одному и тому же результату – химический потенциал молекулы в окружении своих соседей, создающих некоторое эффективное поле  $E$  равен работе поляризации рассматриваемой молекулы. Следует отметить, что обменная часть энергии взаимодействия компонентов в химической реакции всегда сопровождается перестройкой их электронного состояния (электронной поляризацией).

Таким образом универсальный характер электрохимических реакций основывается на эффектах поляризации.

В этом случае химический потенциал молекулы (с точностью до аддитивной постоянной КТ, не зависящей от напряженности электрического поля) можно представить в виде:

$$\mu = -PE = A_i, \quad (5)$$

где  $P$  – дипольный момент,

$E$  – напряженность электрического поля,

$A_i$  – работа электрического поля.

Формула (5) в результате несложных преобразований может быть записана в виде:

$$\delta A_i = -ed\varphi \quad (6)$$

В этом случае потенциал Гиббса в изобарно-изотермических условиях может быть записан [1-2]:

$$dG_{pV} = \sum N_i d\mu_i = \sum N_i ed\varphi = \sum N_i Edp_i \quad (7)$$

Каждое из выражений (7) представляет собой произведение интенсивной величины на экстенсивную. В качестве экстенсивной величины выступает плотность молекул ( $N_i$ ), а в качестве интенсивной – химический потенциал, электрическая работа свободных  $ed\varphi$  или связанных зарядов  $pdE$ .

С учётом электрокапиллярных явлений, которые возникают при образовании поверхности раздела двух соприкасающихся фаз, потенциал Гиббса записывается следующим образом:

$$dG_S = \delta dF + Edp$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,

$P$  – дипольный момент,

$\delta$  – поверхностное натяжение,  
 $F$  – площадь поверхности.

Используя для уравнения (7) преобразование Максвелла, и уравнение Пуассона  $\left\{ \frac{\partial E}{\partial z} = -4\pi(\rho^{\text{своб}} + \rho^{\text{связ}}) \right\}$ , где  $z$  – линейный размер поверхности слоя}, было получено фундаментальное уравнение электрокапиллярности [4, 14]:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \chi} = -\rho^{\text{своб}} + \rho^{\text{связ}} = -q \quad (8)$$

где  $\rho^{\text{своб}}$  и  $\rho^{\text{связ}}$  – поверхностная плотность свободного и связанного зарядов,  
 $\chi$  – скачок потенциала на границе раздела сред.

Под свободным зарядом понимают все электрические заряды, которые под влиянием электрического поля могут перемещаться на макроскопические расстояния.

Уравнение (8) носит название «Первое уравнение Липпмана» [6].

Заряды, входящие в состав молекул, диполей и т.д. называются связанными. Формула (8) получена строго термодинамически и не содержит никаких допущений или модельных представлений. Первая часть представляет собой полный заряд поверхностного слоя, находящийся в усредненном электростатическом поле  $E$ . Левая часть уравнения (8) показывает, что устойчивое состояние границы раздела достигается за счет компенсации сил электростатического и неэлектростатического происхождения. При выводе уравнения (8) не было использовано никаких ограничений. Поэтому оно справедливо при описании любых межфазных границ, которые возникают при работе ХИТ и СКС.

В связи с тем, что химический потенциал  $\mu$  равен  $-PE$ , произведению дипольного момента на эффективное поле:

$$\mu = -PE \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет сделать вывод, что химический потенциал молекулы в окружении своих соседей, создающих некоторое эффективное поле  $E$ , равен работе поляризации этой молекулы.

$$A_n = pE = \mu \quad (10)$$

где  $A_n$  – работа поляризации молекулы.

Дифференциал уравнения (10) можно записать как

$$dA_n = p dE + E dp = d\mu \quad (11)$$

В соответствии с уравнением первого и второго законов термодинамики можно записать как [4]

$$dG_{(dT=0, dp=0)} = \sum N_i d\mu_i \quad (12)$$

Соотношение

$$dG = \sum N_i d\mu_i = N_i e d\Delta\varphi \quad (13)$$

широко используется в теории гальванических элементов, преобразующих, в первую очередь, энергию химической реакции в электрическую [1-2]. В интегральной форме это уравнение можно записать в следующем виде:

$$\Delta G_{\text{хим.р.}}^\circ = \sum \Delta G_{f_{\text{кон}}}^\circ - G_{f_{\text{исх}}}^\circ = \sum N_i \mu_{\text{кон}}^\circ - \sum N_i \mu_{\text{исх}}^\circ = z\varepsilon \quad (14)$$

где  $z = \sum N_i e$  – количество электричества (заряд), прошедшее по внешней цепи гальванического элемента. Этот заряд как следует из уравнения (14) пропорционален количеству прореагировавшего в элементе вещества, ЭДС  $= \sum \Delta\varphi_i$  представляет собой электродвижущую силу (ЭДС) элемента, равную сумме скачков потенциалов  $\sum \Delta\varphi_i$ . В этом случае ЭДС элемента в первом приближении может быть оценена как

$$\text{ЭДС} = \frac{\Delta G_{\text{хим.р.}}^\circ}{z} \quad (15)$$

Уравнение (11) рассматривает ситуацию, когда в системе происходят только процессы, связанные с перемещением постоянных дипольных моментов. Это объясняется тем, что при комнатных температурах и напряжениях до 10 вольт вклад в поляризованность от индуцированных дипольных моментов примерно в 100 раз меньше, чем от постоянных [7].

Поэтому в полном дифференциале на границе раздела гладких поверхностей величиной  $E_dP$  в уравнении (11) обычно пренебрегают. Однако на наноструктурированной границе раздела сред, где напряженность электрического поля может превышать  $10^6 \div 10^7$  [8], вклад в общую поляризацию индуцированных дипольных моментов будет более значительным.

Это позволяет сделать вывод о перспективности использования наноструктурированных электродных материалов и активных реагентов для ХИТ. Это связано как с увеличением величины потенциала Гиббса в результате формирования энергоемких границ раздела в активном реагенте, а также на границе раздела реагент электродный материал.

### Системы без протекания химических реакций (Сверхъемкие конденсаторы электролитические структуры)

Поскольку уравнение (8) определяет величину заряда независимо от его происхождения, оно приложено к электрокапиллярным системам для любых контактирующих систем.

Ключевым параметром систем, накапливающих электрическую энергию без протекания химических реакций, является электрическая емкость.

Электрической емкостью называется отношение заряда  $q$  к потенциалу системы [7]

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (16)$$

где  $C$  – емкость проводника, выражаемая в фарадах ( $1\text{Ф} = 9 \cdot 10^{11}\text{см}$ ).

Производная от заряда по потенциалу дает дифференциальную емкость ( $C_d$ ), т.е. величину, характеризующую изменение заряда с потенциалом.

$$\frac{dq}{d\varphi} = C_d \quad (17)$$

Величину дифференциальной емкости можно найти с помощью электрокапиллярных кривых. Из уравнения (11) и (17) следует, что

$$-\frac{d^2\delta}{d\varphi^2} = \frac{dq}{d\varphi} = C_d \quad (18)$$

Выражение (18) носит название «Второе уравнение Липпмана».

Уравнение (18) можно представить в следующем виде:

$$dq = C_d d\varphi \quad (19)$$

Интегрирование уравнения дает интегральную емкость  $C$ . Для плоского конденсатора интегральная емкость выражается следующим уравнением:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (20)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая константа,

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,

$S$  – площадь обкладок конденсатора,

$d$  – расстояние между обкладками [7].

Энергия, запасаемая в конденсаторной структуре по квадратной зависимости, растет с увеличением напряжения в конденсаторе:

$$E = \frac{CU^2}{2} \quad (21)$$

Уравнение (19-21) показывают влияние среднестатистических макропараметров и недостаточно четко показывают влияние свободных и связанных зарядов на энергоемкость СКС.

В работе [1-2] было показано влияние связанных и свободных зарядов на емкость ДЭС, которые были названы дипольной и электронной составляющей соответственно. Уравнение Липпмана может быть преобразовано к виду:

$$\frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{d\varphi_e}{d\rho} + \frac{d\varphi_d}{d\rho} \text{ или } C^{-1} = C_e^{-1} + C_d^{-1} \quad (22)$$

где  $C_e^{-1}$  – электронная часть емкости ДЭС,

$C_d^{-1}$  – дипольная часть емкости ДЭС.

В этом случае выражение для емкости электронной части ДЭС может быть представлено в виде:

$$C_e = \frac{d\rho}{d\Delta x} = \frac{dp_e^V}{dz} \cdot \frac{dz}{d\Delta x} = \frac{p_e^V}{p_e^S} \cdot \frac{\varepsilon_S}{4\pi} \quad (23)$$

где  $p_e^V$  и  $p_e^S$  соответственно объемная и поверхностная плотности свободного заряда,  $z$  – толщина ДЭС,

$\Delta\chi$  – скачок потенциала на границе раздела,

$\varepsilon_S$  – диэлектрическая проницаемость ДЭС.

Уравнение (23) позволяет сразу сделать вывод о том, что в качестве электродного материала необходимо использовать вещества с высокой электропроводностью.

Второе слагаемое в уравнении (22) записывается в следующем виде:

$$\frac{d\rho}{d\varphi_d} = \frac{d\rho}{d\rho_d} \cdot \frac{d\rho_d}{d\varphi_d} = \bar{\varepsilon} \frac{d\rho_d}{d\varphi} = C_d \quad (24)$$

где  $\frac{d\rho}{d\rho_d} = \bar{\varepsilon} - \text{const}$ , т.е. представляет эффективную диэлектрическую проницаемость, усредненную по всему дипольному слою.

Уравнение (24) позволяет сделать вывод, что емкость ДЭС растет с увеличением количества диполей и величины дипольного момента ДЭС, что обеспечивает рост  $\varepsilon_3$  и фактора  $\frac{d\rho_d}{d\varphi}$ .

В уравнения (11) и (23) входит один очень важный параметр, определяющий рабочее напряжение ХИТ и ряда СКС, который называется скачок потенциала на границе раздела ( $\Delta\chi$ ). Феноменологическое рассмотрение электростатики границы раздела [2] позволило получить аналитическое выражение для определения скачка потенциала:

$$\Delta\chi = \frac{W}{e} - \frac{K_B T}{e} \ln \frac{2\pi e^2}{(3\pi^2)^{\frac{1}{3}} \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{2\pi m}{n^2 K_B}} + \text{const} \quad (25)$$

где  $W$  – работа выхода электрона,

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость ДЭС,

$m$  – масса электрона.

Из уравнения (25) следует, что поверхностный скачок потенциала с точностью до некоторой постоянной определяется работой выхода электрона в окружающую среду. Эта формула, полученная на основе квантово-механических представлений, согласуется с термодинамическими подходами к определению  $\Delta\chi$  [2, 3, 6].

### **Теоретическое обоснование увеличения энергоемкости вторичных ХИТ и СКС**

В настоящее время энергоемкость литиевых источников тока (которые являются чемпионами энергоемкости среди химических источников тока – ХИТ) составляет  $220-250 \frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{кг}}$ , а энергоемкость сверхъемких конденсаторных структур (СКС)  $10-20 \frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{кг}}$ . Поэтому актуальность и своевременность решения задачи, обеспечивающей повышение энергоемкости существующих аккумуляторов электрической энергии, не вызывает сомнения.

В соответствии с обобщенным уравнением первого и второго законов термодинамики подвод и отвод энергии в системе может осуществляться только двумя способами. Подвести и отвести энергию можно в виде тепла или в виде работы. Математически это утверждение записывается следующим образом:

$$E = T \cdot S \pm \sum_{i=0}^n A_i \quad (26)$$

где  $E$  – энергия, подводимая к системе,  $T$  – температура системы,  $S$  – энтропия системы,  $-A_i$  – работа, производимая системой (когда энергия отводится) или  $+A_i$ , когда энергия подводится к системе.

Работа  $A_i$  может быть выражена как произведение двух величин экстенсивных –  $X$  (объем, путь, заряд и т.д.) и интенсивных –  $Y$  (давление, сила, потенциал и т.д.).

В этом случае для обратимых процессов, протекающих в открытых системах (к которым относится поверхность твёрдого тела) уравнение (26) записывается следующим образом [9 - 11]:

$$dE = TdS + PdV + \delta dF + \varphi dq + \sum \mu_i dn \dots \quad (26)$$

где  $V$ ,  $F$ ,  $q$ ,  $n$  – экстенсивные величины – объем, площадь, заряд и мольная доля прореагировавших веществ соответственно, а  $P$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\mu_i$  – интенсивные величины – давление, поверхностное натяжение, электрический потенциал, химический потенциал соответственно.

Уравнение (26) справедливо в тех случаях, когда интенсивная величина  $y = f(x)$ , выражается гладкой функцией. Если зависимость более сложная, как это происходит в наноструктурированных материалах, наноструктура существенным образом меняет энергоёмкость системы.

В этом случае появляется в полном дифференциале зависимость экстенсивных и интенсивных параметров от наноструктуры, которая существенным образом меняет энергоёмкость системы в целом. Например, теплоёмкость системы в уравнении монолитного материала определяется произведением ( $CdT = dQ = TdS$ ).

Т. е. определяется первыми членами, содержащими энтропию. Экспериментально показано, что теплоёмкость наноструктурированного материала существенно выше, чем у того же материала при отсутствии наноструктуры (Сера –  $S$  ромбическая  $S = 22,69 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{K}}$ ,

$S$  моноклинная,  $S = 23,64 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{K}}$ ,  $S_{2(\text{газ})} = 32,50 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{K}}$ ,  $S_{8(\text{газ})} = 160,7 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{K}}$ ).

Такая же ситуация с удельной энергией объема и поверхности. Поверхность всегда имеет существенно выше удельную энергию и на поверхности всегда появляются электрические заряды.

Таким образом можно сделать вывод о том, что наноструктурированные системы принципиально отличаются по энергоёмкости от монолитных материалов, а многочисленные эксперименты однозначно подтверждают теоретический результат. Проведенный анализ показывает, что в результате наноструктурирования системы возникают механизмы накопления энергии не только за счет химических реакций, но и формирования зарядов на границе раздела, т.е. появление электрических сил и соответствующей работы, а также других возможных видов работ, которые принципиально могут перейти в электрическую работу при наличии соответствующего механизма. В качестве иллюстрации этого важного вывода можно привести пример преобразования механической энергии в электрическую. В соответствии с первым законом термодинамики все виды энергии в эквивалентных количествах могут переходить из одного вида в другой.

Но для того, чтобы преобразовать механическую энергию в электрическую необходим специальный материал – пьезоэлектрик, который имеет механизм такого преобразования. Как правило, на границе раздела сред всегда больше энергетических неоднородностей, которые обеспечивают функционирование таких механизмов.

Поэтому наноструктурирование материала (формирование громадного количества границ раздела сред) с одной стороны создает существенно больший запас энергии в сравнении с монолитными материалами, а с другой стороны, позволяет создавать механизмы, которые различные виды энергии преобразуют в электрическую.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что механизм накопления электрической энергии с помощью ХИТ и СКС один и тот же и связан с перераспределением электрических зарядов в системе ( $A_{x.z.} = A_n = pE$ ).
2. Величина накапливаемой энергии определяется работой перемещения зарядов в заданном направлении может выражаться формулой:  $W = PE$ , где  $W$  – работа,  $P$  – дипольный момент,  $E$  – электрическое поле. Эта зависимость определяет

- энергоемкость ХИТ и СКС.
3. Для повышения энергоемкости ХИТ химически активное вещество должно быть наноструктурировано с целью увеличения количества дипольных молекул и их величины, а электродные материалы должны обеспечивать стабильное сохранение исходной наноструктуры в процессе функционирования.
  4. Энергоемкость СКС определяется двумя основными параметрами. Электрическая емкость конденсаторной структуры (С) и рабочее напряжение конденсатора U. Энергоемкость СКС ( $A_i$ ) определяется формулой  $A_i = \frac{CU^2}{2}$ .

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Р. Салем «Физическая химия. Начала теоретической электрохимии» Издательство: "КомКнига" 2009 г.
2. Слепцов В.В. «Физико-химические основы наноматериалов и нанотехнологий». ООО «Сам Полиграфист» Москва 2015г.
3. Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. «Электрохимия» издательство «Химия» 2010г.
4. Льюис Дж. Рендил.М «Химическая термодинамика». Издательство «ОНТИ Химтеорет» Москва 1936 г.
5. Салем Р.Р. «Теория двойного слоя». Издательство Физматлит Москва 2003 г.
6. Антропов Л.И. «Теоретическая электрохимия». Издательство «Высшая школа», Москва 1975г.
7. Матвеев А.Н. «Электричество и магнетизм». Издательство Лань Санкт-Петербург-Москва 2010 г.
8. Б.И.Седунов, Д.А.Франк-Коменецкий «Диэлектрическая проницаемость биологических объектов», Успехи физических наук, апрель 1963г. т. LXXIX, вып. 4 стр. 617-639.
9. Мэлвин-Хьюз Э.А. «Физическая химия» Издательство И.Л Москва 1962г.
10. Герасимов Я.И; Древинг В.П; Еремин Е.Н и др общ.ред Герасимов А.А. «Курс физической химии», Издательство Химия, Москва 1969 г.
11. Пригожин М. и Дефэй Р. «Химическая термодинамика». Издательство «Бином» Москва 2010г.