

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ  
СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ  
и  
ЕМКОСТНАЯ ДЕИОНИЗАЦИЯ  
ВОДНЫХ РАСТВОРОВ**

*Вольфкович Ю.М.*

**Институт физической химии и электрохимии  
им. А.Н. Фрумкина РАН**

*«Нет ничего практичнее хорошей теории».*

*Густав Кирхгоф*

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ**

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ  
И ЕМКОСТНЫХ ДЕИОНИЗАТОРОВ:**

**1) ТЕОРИЯ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

**2) ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В  
ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛАХ.**

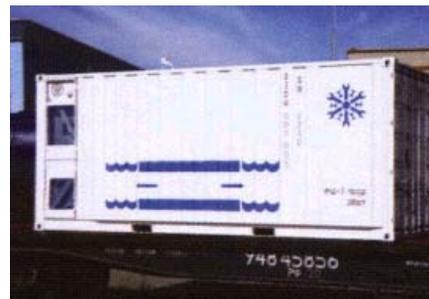
**ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДЕИОНИЗАТОРОВ ТАКЖЕ:**

**3) ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА**

Москва Пуск двигателей автомобилей, тракторов, локомотивов, стационарных и судовых двигателей и т.п. в в любых климатических условиях или от разряженной АБ



Например: КСП для



локомотива,

рефрижераторного вагона, рейсового автобуса

Конденсаторная система пуска (КСП)

Тип ИКЭ, кДж/В	U, В	C, Ф	P <sub>max</sub> , кВт	I <sub>max</sub> , А	Объем, дм <sup>3</sup>	Вес ИКЭ, кг	Примечания
25/14	14	255	16,3	2300	11,4	27,0	Пуск двигателей легковых и грузовых автомобилей, лодочных моторов, тракторов, автобусов, комбайнов, рефрижераторных вагонов.
40/28	28	100	39,2	2800	15,0	32,0	
60/28	28	160	65,3	4600	18,7	38,0	
40/64	64	23,0	93,8	2125	17,2	38,0	Пуск двигателей локомотивов, дизельных поездов.
40/96	96	8,50	86,4	1300	16,2	34,0	

The main advantages of the DesEI System over conventional water treatment technologies are:

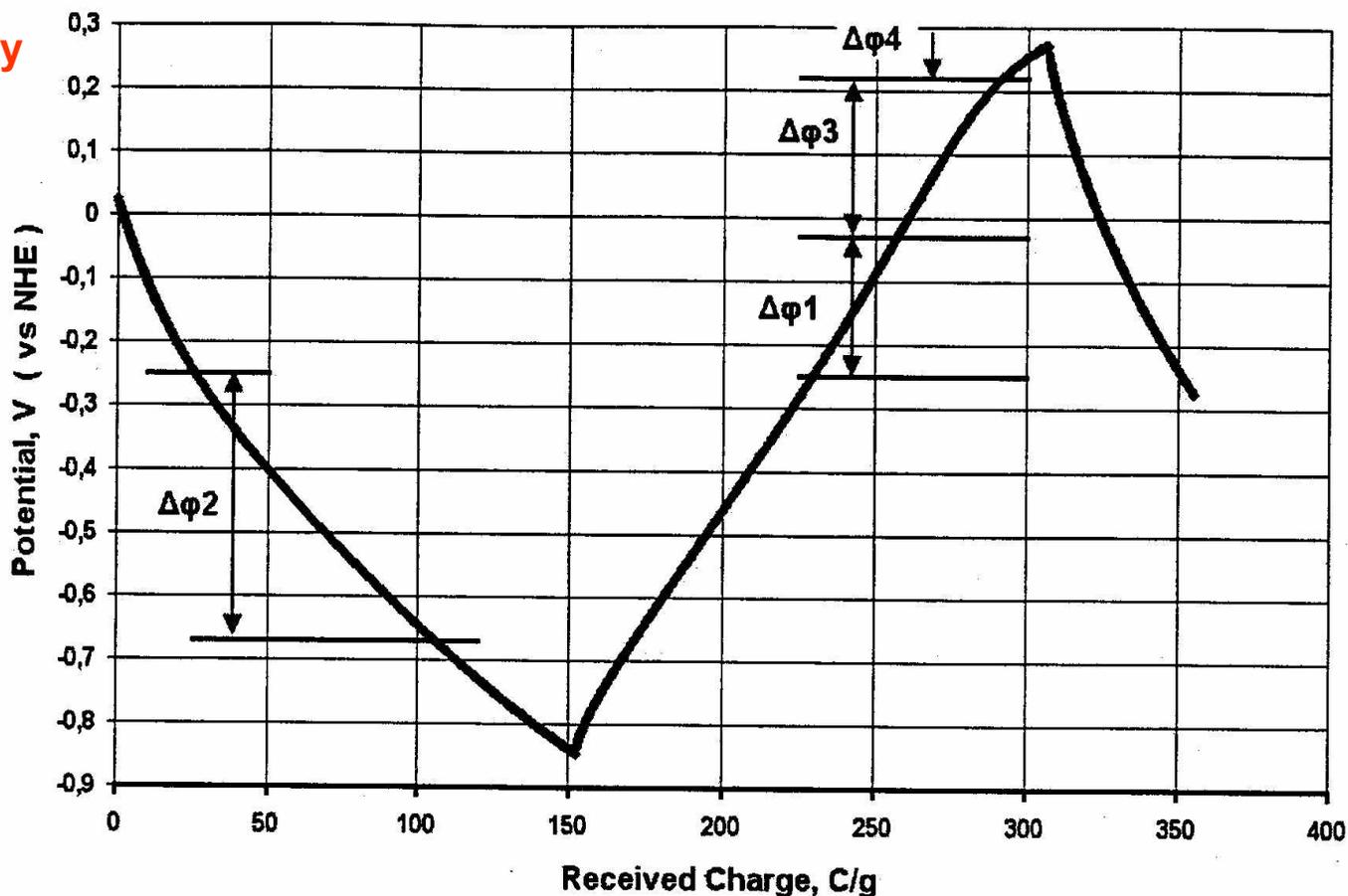
1. No sub 15 micron-filtration required.
2. No sustained concentrate leading to the formation of precipitates and fouling.
3. Extremely high water recoveries coupled with high ion removal efficiencies.
4. Long life cycle of capacitor materials.
5. Low maintenance.
6. No continued addition of salts to treated water as with ion exchange.
7. Chemically stable components preclude the introduction of foreign materials into the treatment stream.
8. Readily removes problem contaminants such as nitrate, perchlorate and arsenic.
9. Can be designed to preferentially remove contaminants without complete deionization of the water stream.
10. Can be operated at various levels of ion removal and water recovery efficiencies.



Figure 2. DesEI Bench Scale Test Unit

# Форма разрядно-зарядных гальваностатических кривых электрохимического конденсатора

Brian Conway



# Схема устройства и работы двойнослойного конденсатора (ДСК)

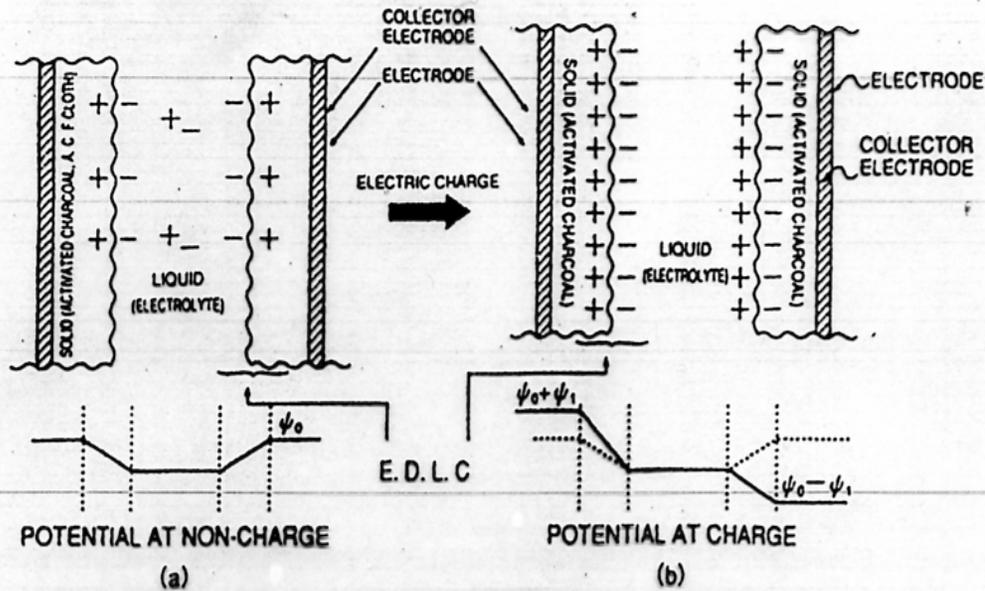
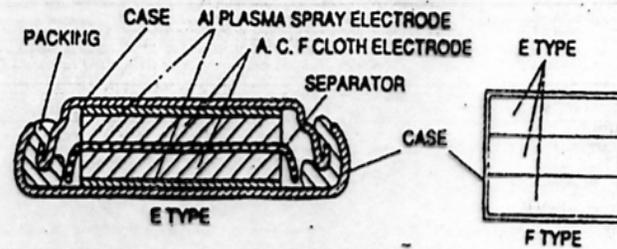


Fig. 17. Structure of electric double-layer capacitor.



PARALLEL CONNECTED CAPACITOR, 3.5 F

# Двойнослойные конденсаторы.

## ОСНОВЫ

$$C = \frac{\varepsilon}{4\pi d}$$

$C$  – удельная емкость ДЭС ~  
(1 - 2) x 10<sup>-5</sup> Ф/см<sup>2</sup> ,

$d$  – расстояние между обкладками ДЭС  
(~ Ангстремы),

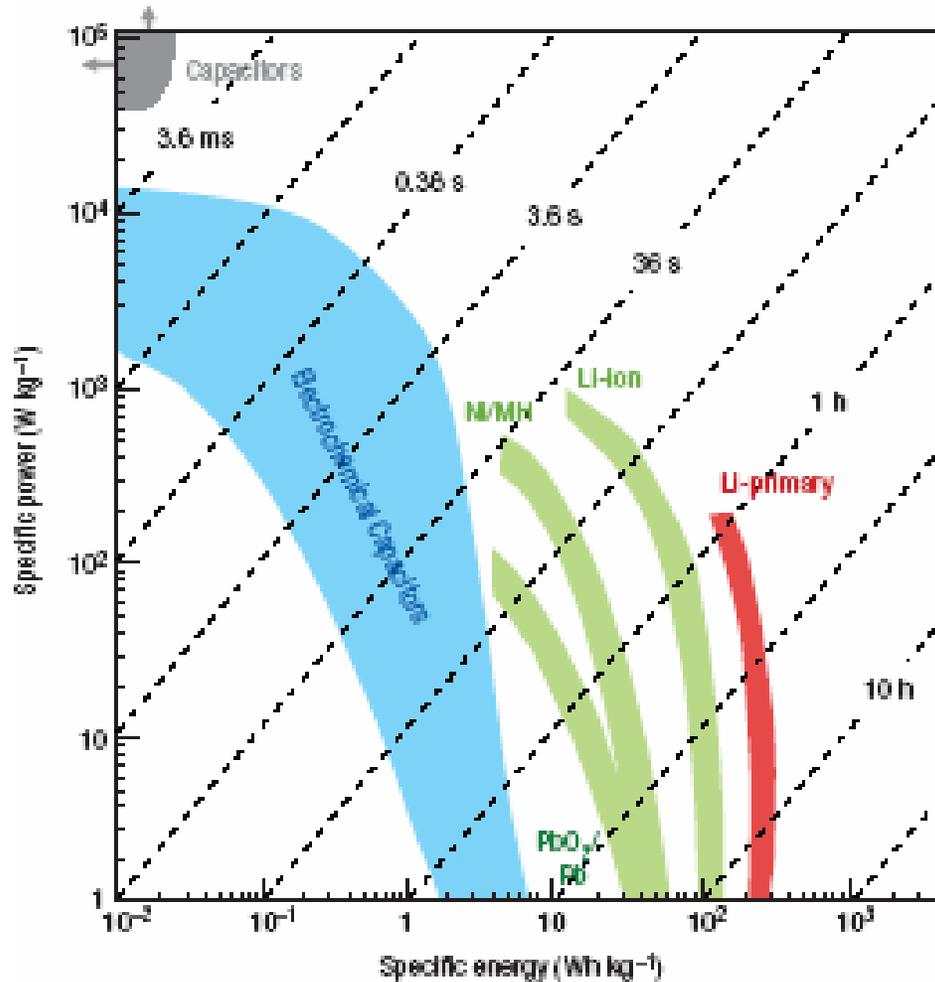
$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,

$$C_g = C \times S \sim (1-2)10^{-5} \text{ Ф/см}^2) \times \\ (1-3)10^7 \text{ см}^2 / \Gamma \sim 100-600 \text{ Ф/}\Gamma$$

# Характеристики различных перезаряжаемых устройств

Устройства	Толщина обкладки, нм	Удельная мощность, Вт/л	Удельная энергия, Втч/л	Время перезарядка	Количество циклов
Аккумуляторы	-	$10^2$	50 - 250	$10^3 - 10^4$	$3 \times 10^2 - 2 \times 10^3$
Псевдоконденсаторы	-	$10^2 - 3 \times 10^2$	10 - 50	$10^2 - 10^3$	$10^4 - 10^6$
Двойнослойные конденсаторы (ДСК)	0.3 – 1	$10^3 - 10^4$	1 - 20	$10^{-2} - 10^0$	$10^5 - 10^6$
Электролитические конденсаторы	$10^3$	$10^4 - 10^5$	$3 \times 10^{-2}$	$10^2 - 10^3$	$10^6$
Бумажные конденсаторы	$2 \times 10^4 - 4 \times 10^4$	$> 10^7$	$< 10^{-3}$	$< 10^3$	$> 10^6$

# Диаграмма Регоне для перезаряжаемых электрохимических устройств: зависимости удельной мощности от удельной энергии



# Преимущества ДСК перед аккумуляторами :

- Практически идеальная обратимость.
- Практически неограниченная циклируемость: 100000-10000000 циклов.
- Очень высокая удельная мощность:
  - 1 – 10 кВт/л.
- Малое время заряда: секунды, минуты.
- Очень широкий температурный диапазон: -50оС - +50оС.
- Высокая надежность. Большой срок службы: 10 лет и более.
- Полная герметичность и отсутствие необходимости обслуживания.
- Отсутствие токсичных компонентов. Экологическая чистота.
- Отсутствие драгоценных и цветных металлов, только для токоотводов.
- Определение величин оставшейся емкости из величины напряжения.

# Некоторые области применения суперконденсаторов:

## СК силового типа

1. В пусковых конденсаторных системах автомобилей и тепловозов для увеличения ресурса аккумулятора.
2. В комбинации с двигателями внутреннего сгорания в целях **рекуперации энергии торможения автомобиля и тепловоза.**
3. В устройствах **импульсной техники**: электроприводы, рентгеновские аппараты, аппараты точечной сварки.

## СК энергетического типа

4. **В комбинации с топливными элементами** в электромобиле.
5. Буферные накопители энергии **для сглаживания пиковых нагрузок электрических подстанций**
6. В источниках бесперебойного питания, например, в компьютерах.
7. В энергетических и информационных портативных устройствах и др.
8. **Замена аккумуляторных батарей в электрическом транспорте по заданному маршруту** в том числе в закрытых помещениях (магазины, склады, оранжереи, животноводческие фермы и птицефермы, экологические зоны и т.п.).

$$\frac{\partial J^+}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D^+ \frac{\partial c}{\partial x} + D^+ c \frac{\partial \tilde{E}}{\partial x} \right) = \frac{Si(\tilde{E})}{F}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial J^-}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( D^- \frac{\partial c}{\partial x} - D^- c \frac{\partial \tilde{E}}{\partial x} \right) = \frac{Si(\tilde{E})}{F}. \quad (5)$$

$$J^- = -J^+. \quad (6)$$

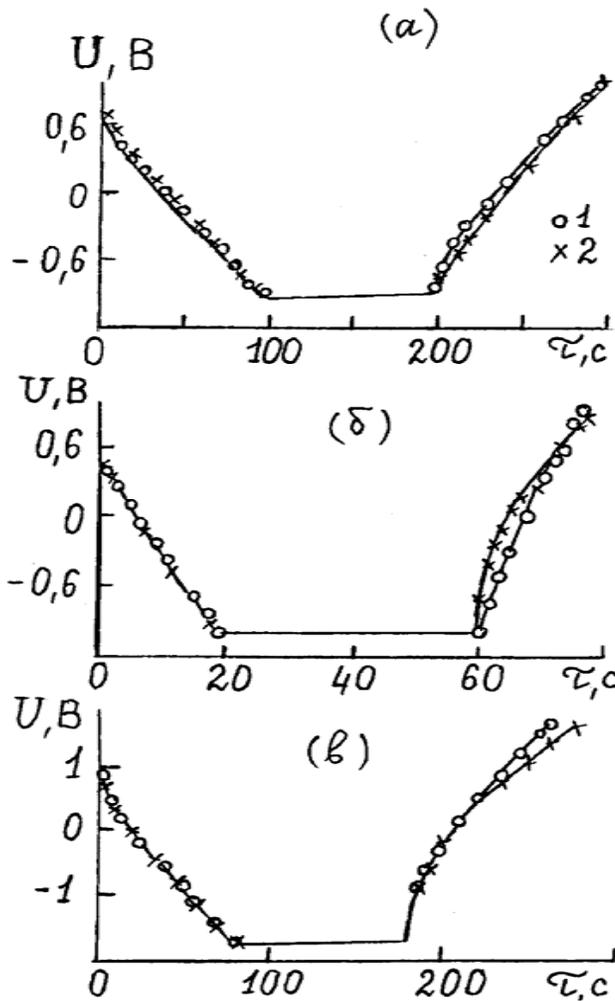
$$\frac{\partial c}{\partial x} = -\left( \frac{D^+ - D^-}{D^+ + D^-} \right) c \frac{\partial \tilde{E}}{\partial x} = (t^- - t^+) c \frac{\partial \tilde{E}}{\partial x}, \quad (7)$$

$$D^j = t^j \kappa RT / c F^2, \quad (8)$$

$$2t^+ t^- \kappa \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = Si(E), \quad (9)$$

$$i = Cs \partial E / \partial \tau,$$

Cs - емкость ДЭС,  $\tau$  - время.



Разрядно-зарядные кривые, рассчитанные (1) и экспериментальные (2); (а) и (б) : 10 N КОН, (а): 0,03 и (б): 0,16 А/см<sup>2</sup> ; (в): 1 М LiAlF<sub>4</sub> + ГБЛ , 0,016 мА/см<sup>2</sup>.

# Максимальная электростатическая удельная энергия ДСК

$$A_{\max} = \int_0^q E \, dq = \int_0^q q / C \, dq$$

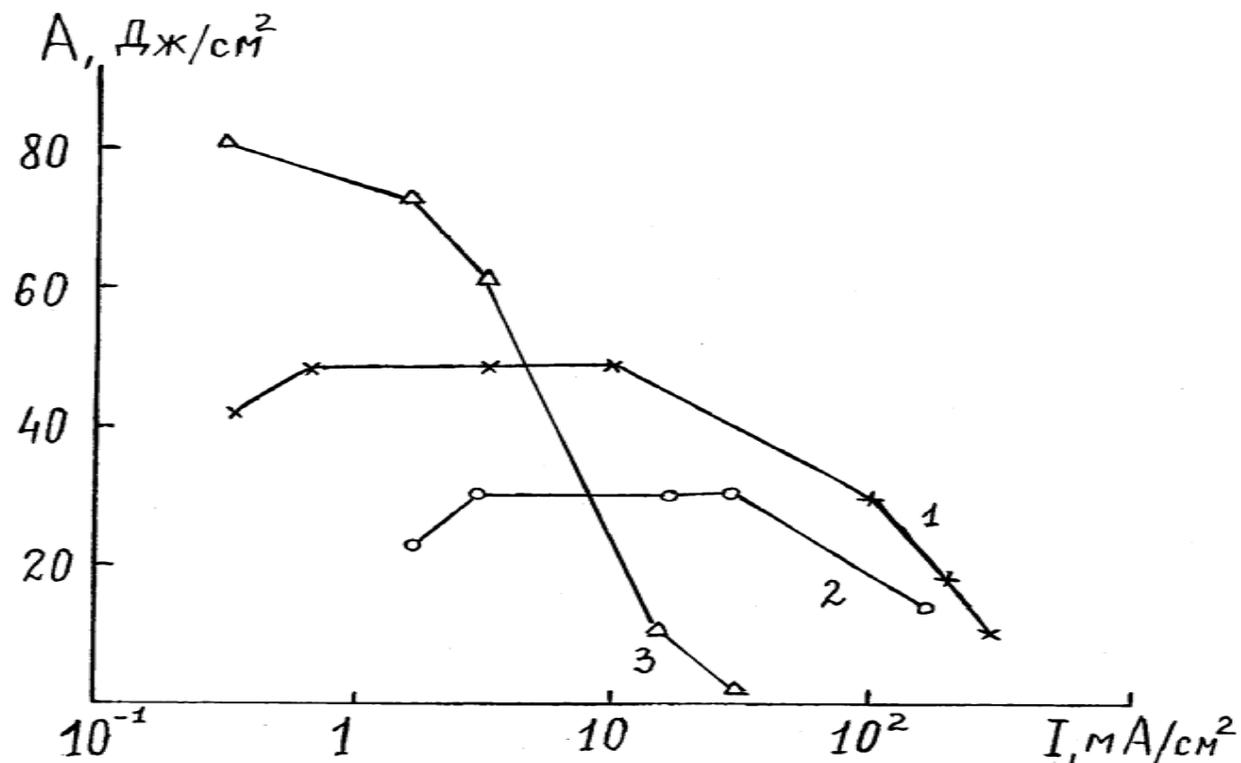
$$C = q / \Delta U$$

$\Delta U$ ,  $q$  - максимальные напряжение и, заряд

$$A = (1/2) C [(U_{\max})^2 - (U_{\min})^2]$$

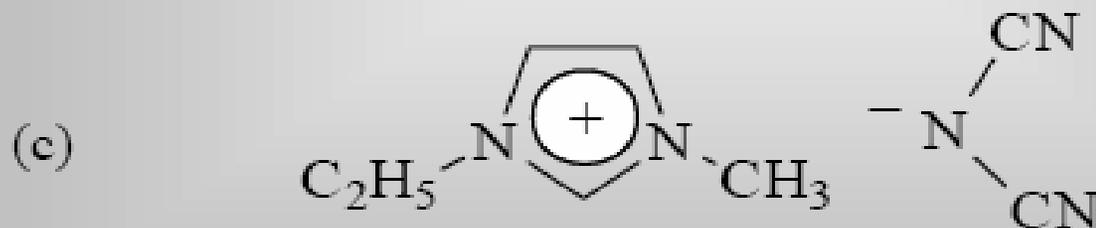
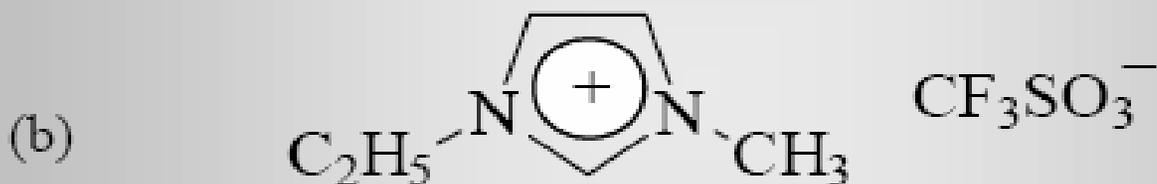
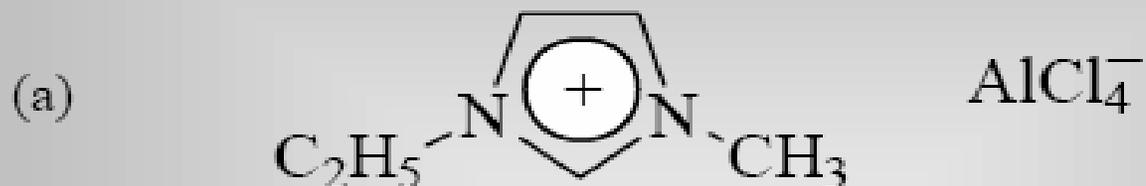
$$A_{\max} = (1/2) C (U_{\max})^2$$

Удельная энергия в зависимости от тока разряда в электролитах: 1 - 35% H<sub>2</sub>SO<sub>2</sub> , 2 - 1N KOH, 3 - 1 M LiAlF<sub>4</sub> + ГБЛ, I = 10 мА/см<sup>2</sup>



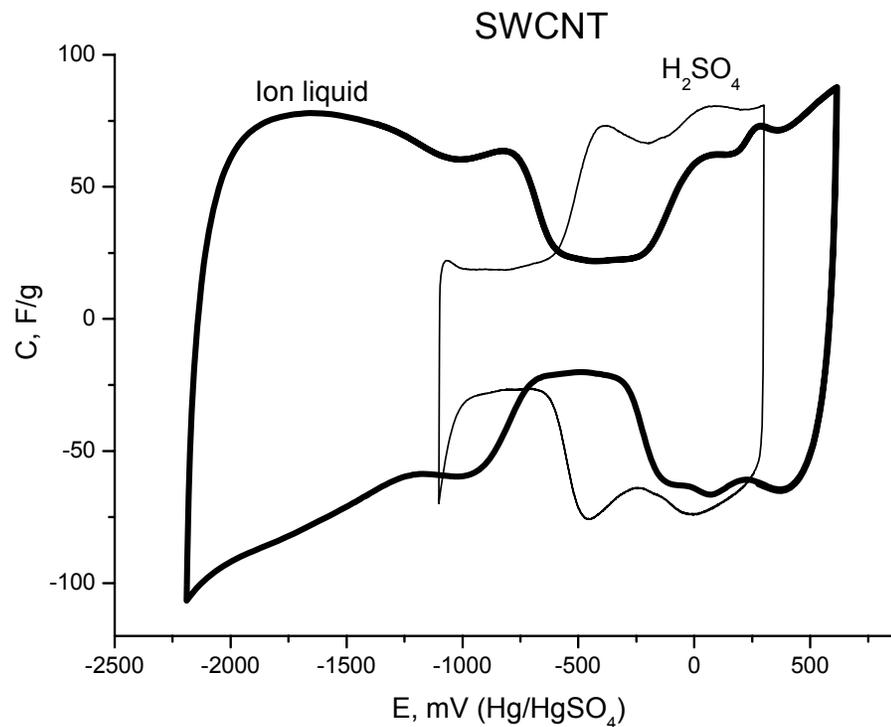
# Ионные жидкости - электролиты ДСК

ILs where cation is ethyl-methylimidazolium (EMI) with different anions



# Использование ионных жидкостей

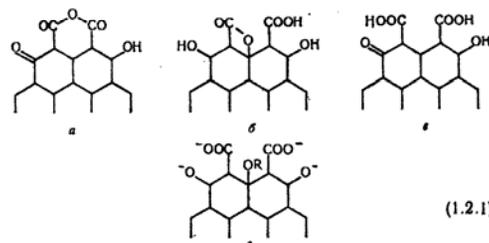
в качестве электролита обеспечивает существенное расширение окна потенциалов и значительное увеличение удельной энергии энергетического суперконденсатора. На рисунке для сравнения приведены потенциодинамические кривые ОСУНТ для электролита в виде ионной жидкости (метил-3-бутилимидазолий тетрафторборат) и для сернокислотного электролита .



# Поверхностные углеродсодержащие группы

Попытки охарактеризовать относительные количества различных функциональных групп на ОУ в связи с их ионообменными свойствами делались во многих работах. Так, в [107, 106] сделан вывод о том, что катионный обмен в водных растворах на феноляльдегидном угле, окисленном воздухом, обусловлен кислотными группами трех типов — карбоксильными, фенольными и относительно свободными ионами водорода.

В работах Бема и сотрудников, обобщенных в [57], для характеристики поверхностных групп угли титровали основаниями различной силы —  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  и  $\text{C}_6\text{H}_5\text{ONa}$ , считая, что бикарбонат натрия нейтрализует наиболее сильноокислотные центры, сода — их же и слабокислотные карбоксильные группы, щелочь — вдобавок и фенольные, тогда как этилат натрия может взаимодействовать даже с еще менее кислыми кислородсодержащими группами, например спиртовыми гидроксильными. На основании анализа этих данных, в сочетании с результатами химического анализа, был сделан вывод о существовании на ОУ по крайней мере четырех типов поверхностных структур:

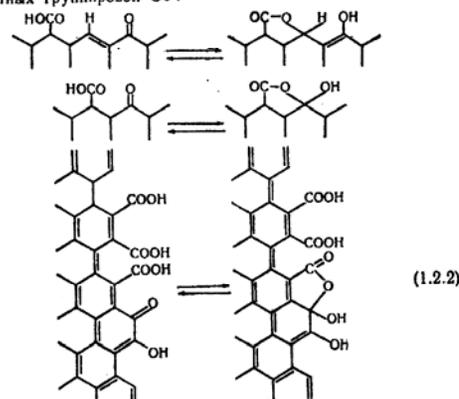


Авторы считали, что при недостатке воды при окислении вероятнее всего будет образовываться группировка (а), главной частью которой является своеобразный поверхностный ангидрид карбоновой кислоты (см. также [64, 81, 82]). В результате гидратации группировка (а) переходит в структуру (б), включающую карбоксильную группу, фенольные гидроксильные и четырехчленное лактонное кольцо, которое при соответствующих условиях, например под действием соды, может размыкаться с перегруппировкой в хинондную структуру и образованием еще одной карбоксильной группы. Этому обстоятельству авторы приписывают, в частности, неодинаковую кислотность поверхностных карбоксильных групп. И, наконец, структуры (в) и (г) содержат типичные карбоксильные и фенольные кислотные группировки.

И. А. Кузин и его сотрудники [79, 80, 212] тоже показали, что на ОУ содержатся фенольные и карбоксильные группы и сильно-

кислотные группировки, причем относительное количество их зависит от способа и степени окисления.

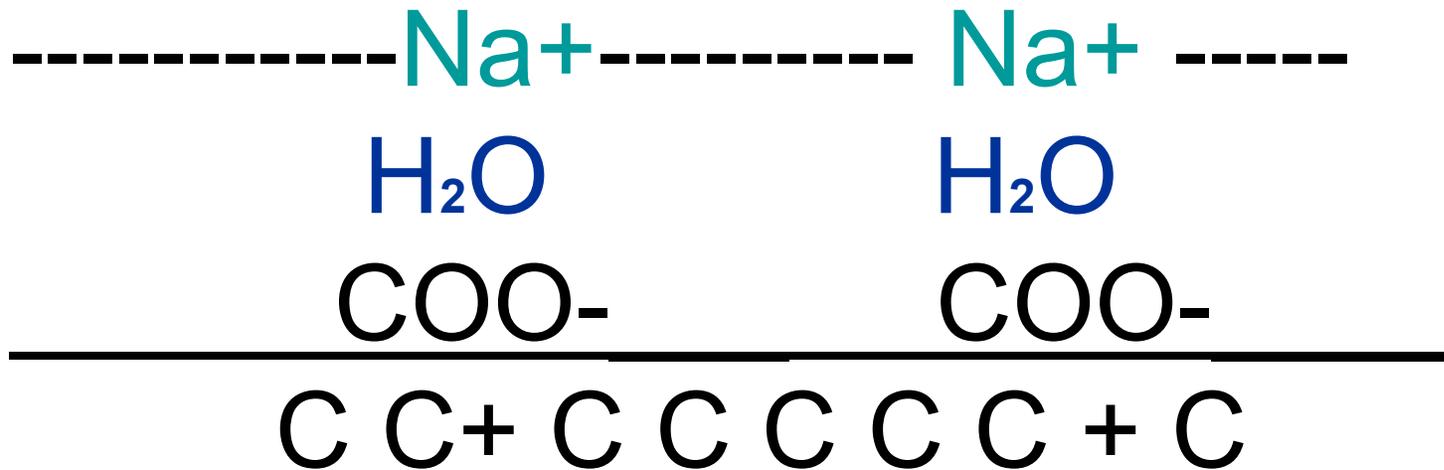
В работах [115, 93] даются похожие, но несколько иные схемы поверхностных группировок ОУ:



Приведенные схемы основаны на большом и разнообразном экспериментальном материале по изучению химической природы поверхности окисленных углеродных материалов, но они в общем не могут считаться вполне определенными и окончательными. Хотя основной структурный элемент всех углей, как уже упоминалось, представляет собой систему конденсированных ароматических колец и связанных с ними цепочек линейно полимеризованного углерода, несущих разнообразные функциональные группы, все же на углях нельзя выделить регулярные образования, подобные элементарной ячейке синтетической ионообменной смолы и пока нет способов, позволяющих достоверно определить взаимное расположение различных групп. В связи с этим описанные выше, равно как и приведенные далее (например, на стр. 131), схемы могут рассматриваться лишь как более или менее вероятные приближения к истинной картине поверхности окисленных углей.

При исследовании ионообменников количество и качество отдельных типов функциональных групп, способных к обмену ионов, чаще всего оценивают на основании анализа кривых титрования. По виду этих кривых (рН раствора как функция количества добавленной щелочи или кислоты, зависимость количества поглощенных ионов — абсолютного или относительного — от рН) можно при-

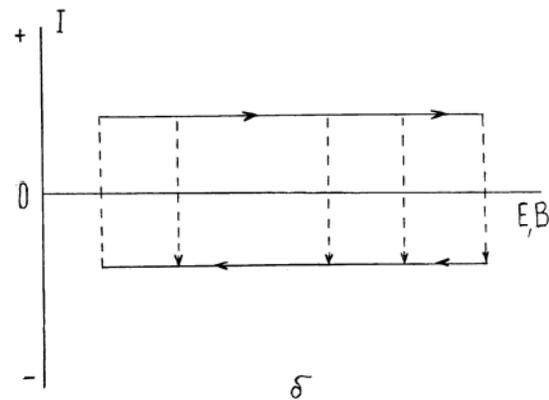
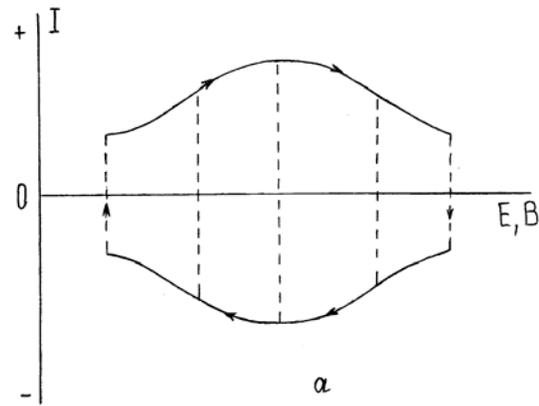
# Плотный ДЭС (Гельмгольца)



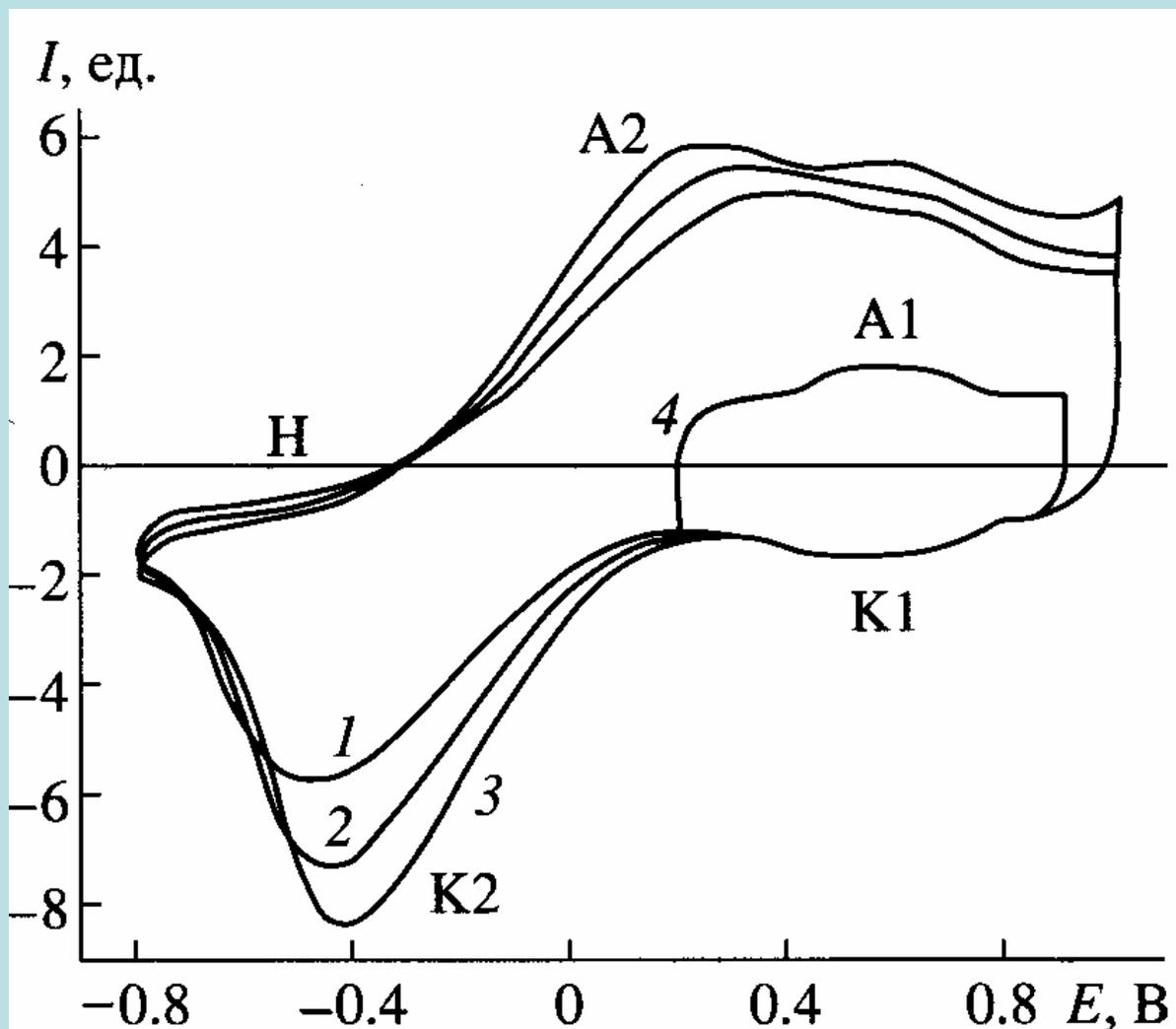
# Зависимости тока от потенциала для:

а) псевдоконденсатора;

б) идеального ДСК

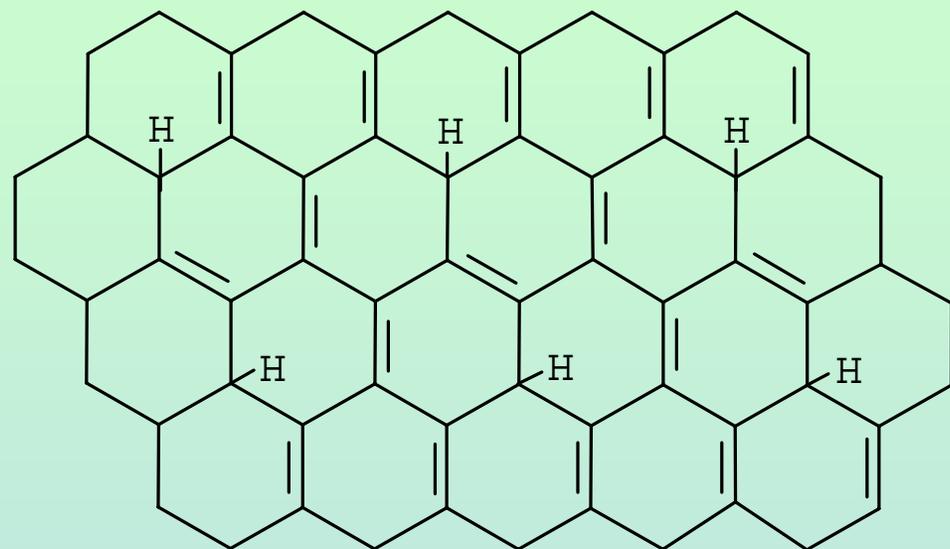


# Двойнослойная емкость и фарадеевская псевдоемкость АУ в конц. серной кислоте

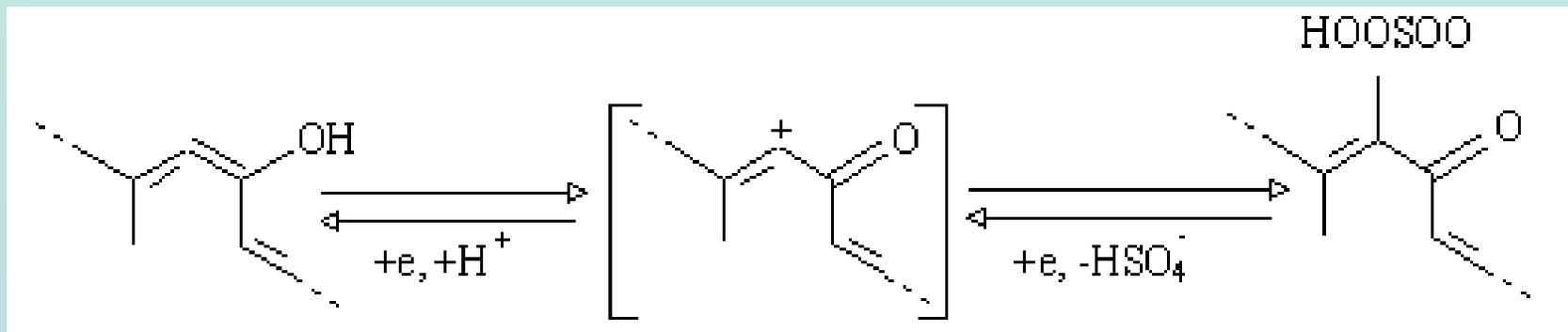


А.Ю. Рычагов, Ю.М. Вольфович, Электрохимия. 44 (2008) 1343.

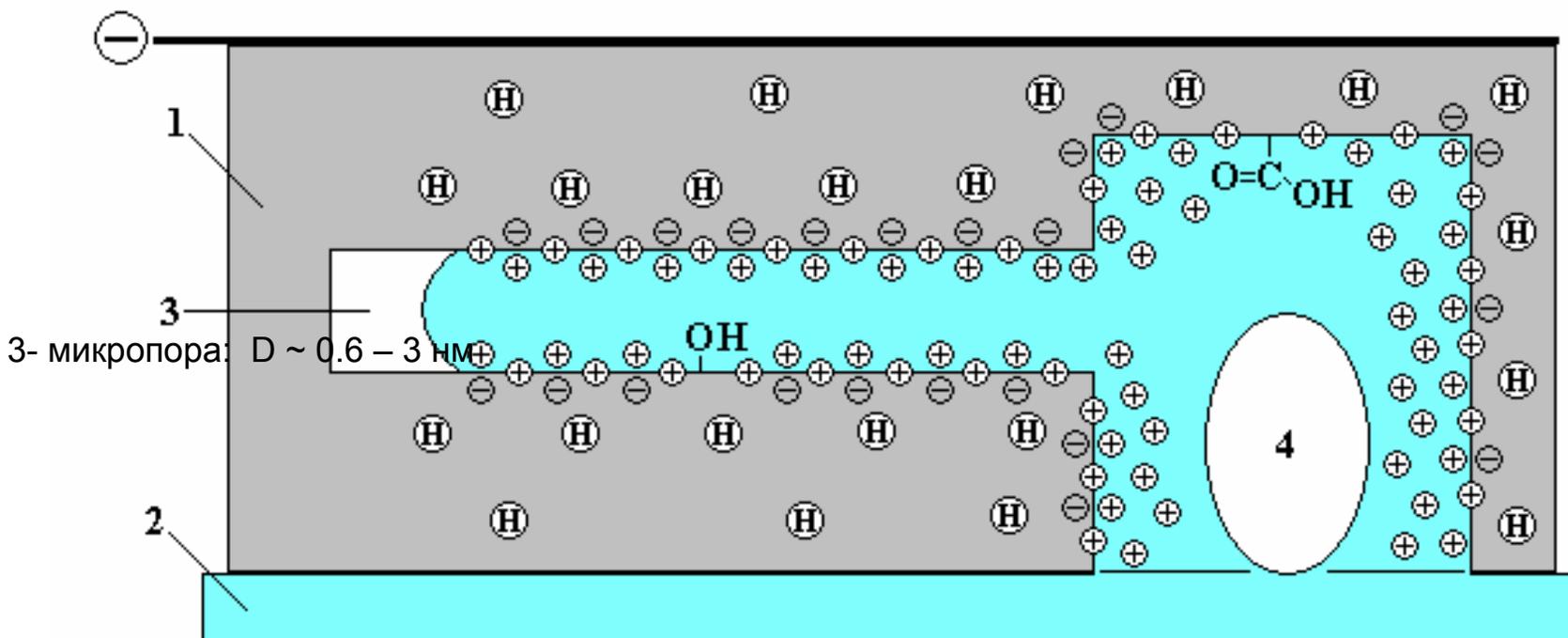
# Механизмы малообратимого и обратимого процессов (C<sub>6</sub>H):



**Q<sub>max</sub> = 1450 Кл/г**



# Схематичное изображение структуры глубоко заряженного угольного электрода

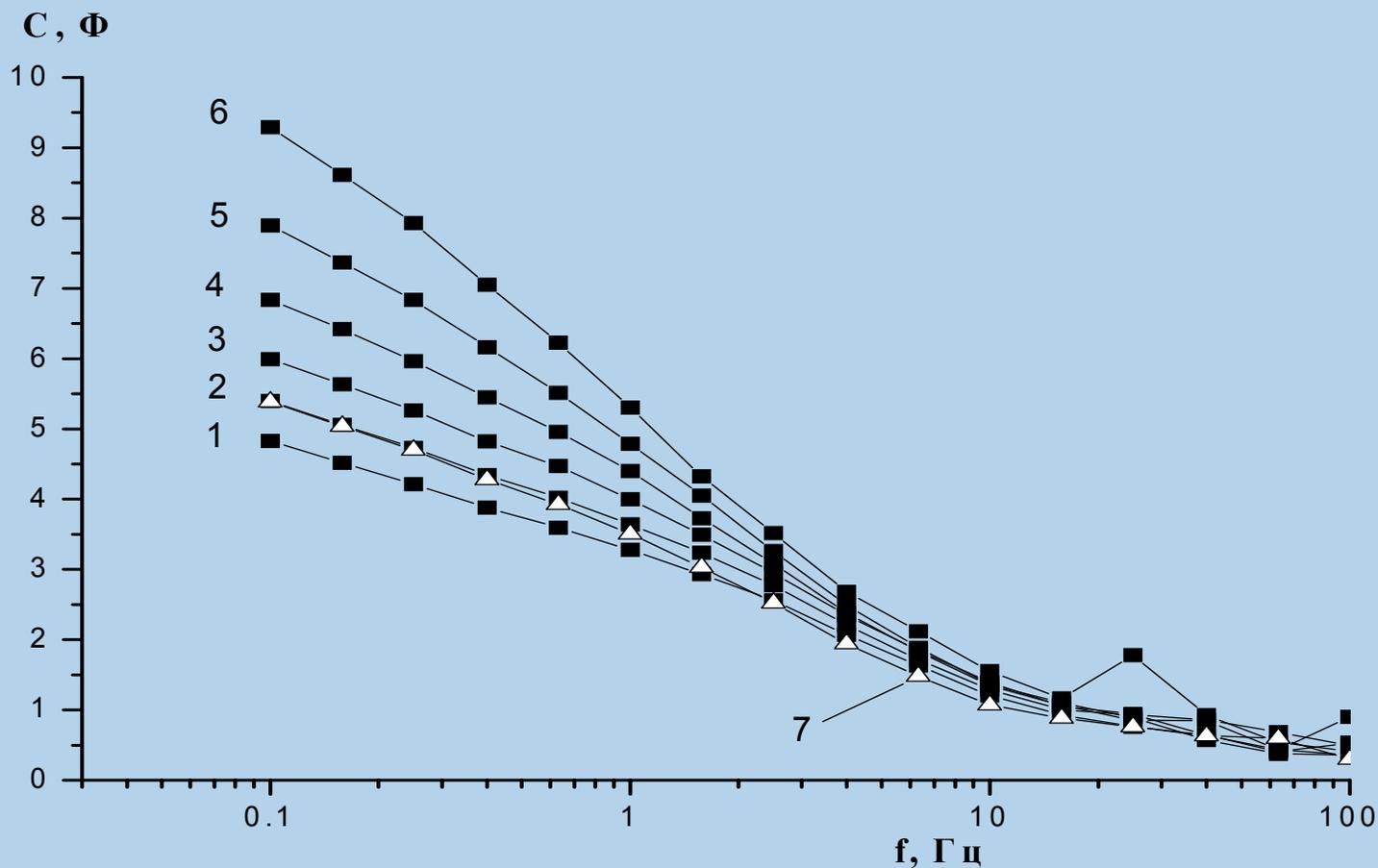


# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭТАЛОННЫЙ ПОРОМЕР, Porotech, Canada

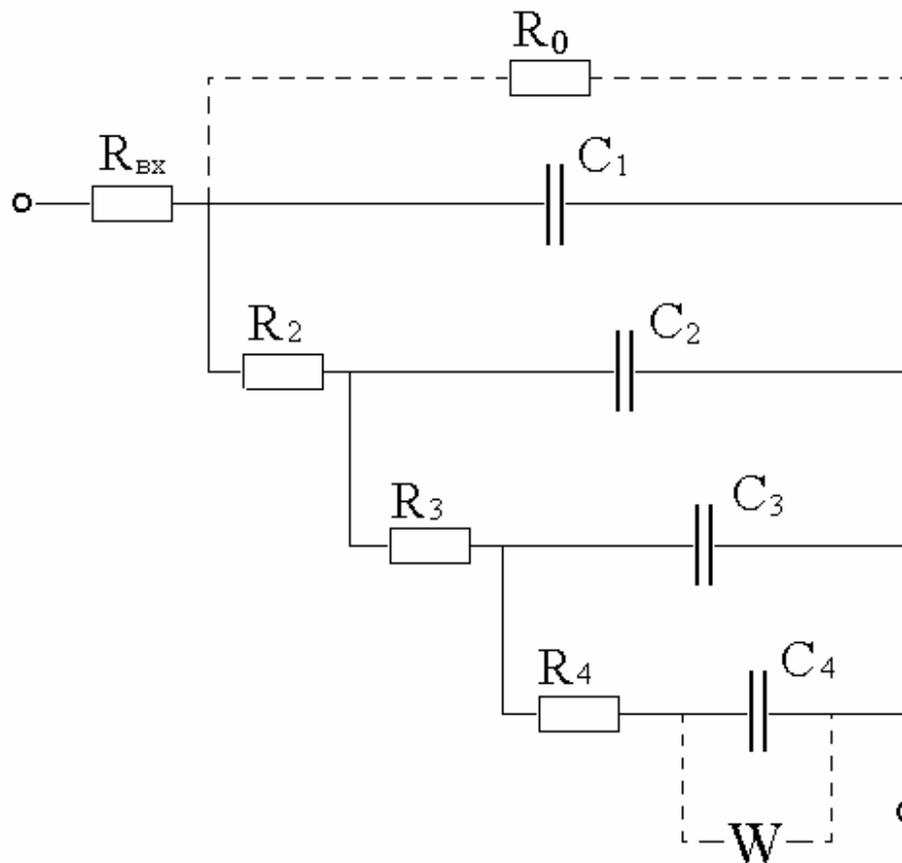


Yu. M. Volkovich, I.A. Blinov, V.E. Sosenkin, US Patent 6,298,711, 2001.

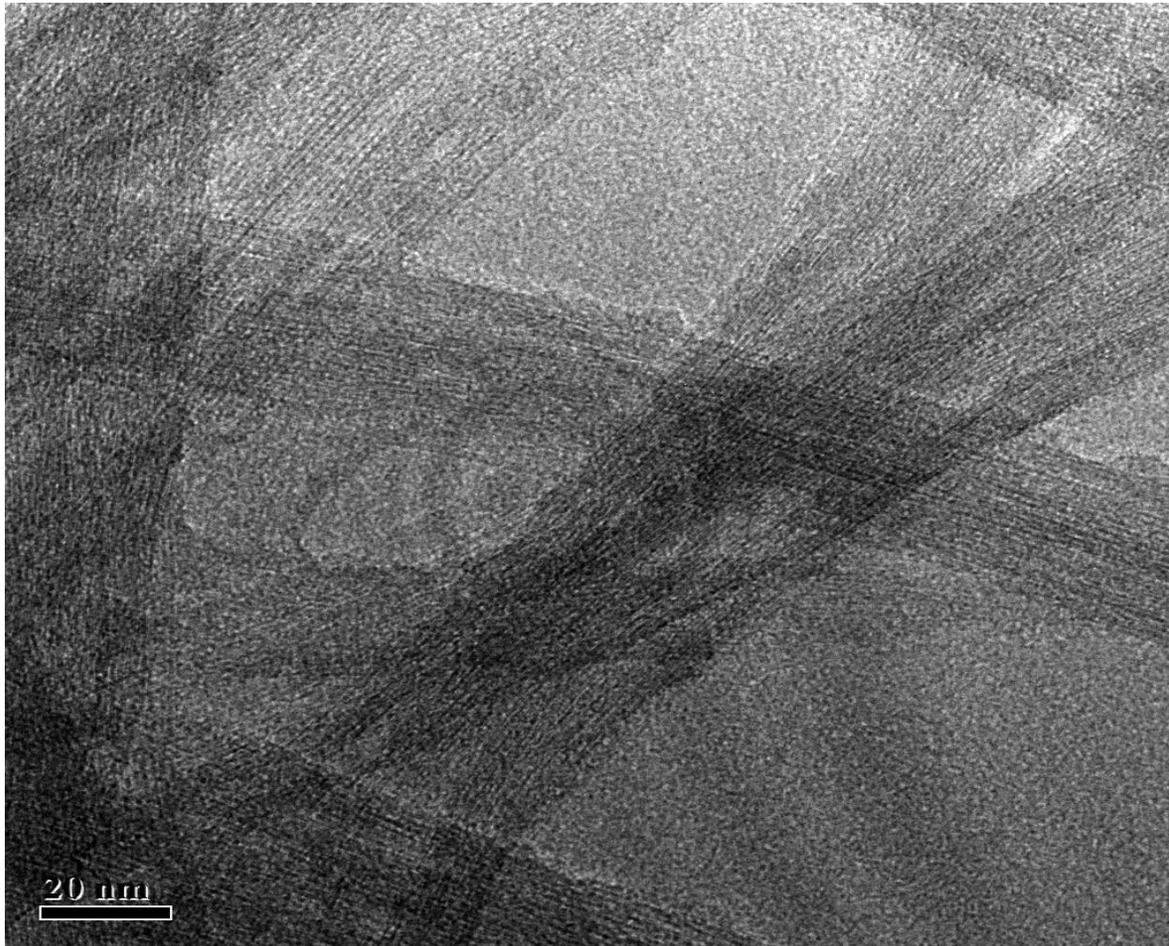
Зависимость емкости, полученной из данных импеданса, от частоты при потенциалах, В (о.в.э.): 1 – -0,1; 2 – 0,0; 3 – 0,1; 4 – 0,2; 5 – 0,3; 6 – 0,4; 7 – 1,0.



# Лестничная эквивалентная схема



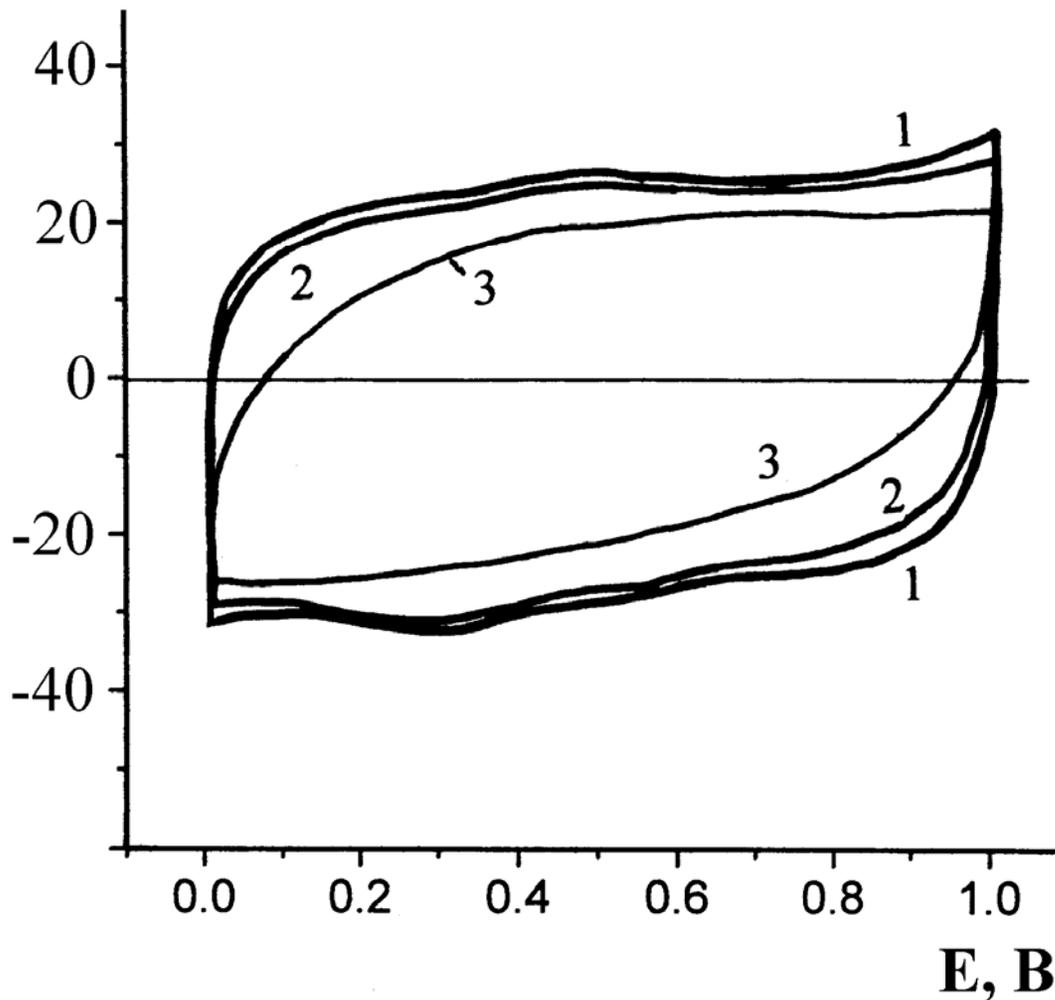
# Структура углеродных однослойных нанотрубок (СЭМ)



# Обратимость процесса заряжения ДЭС в углеродных наноматериалах

С, Ф/г

Одностенные нанотрубки ИПХФ РАН, Черноголовка



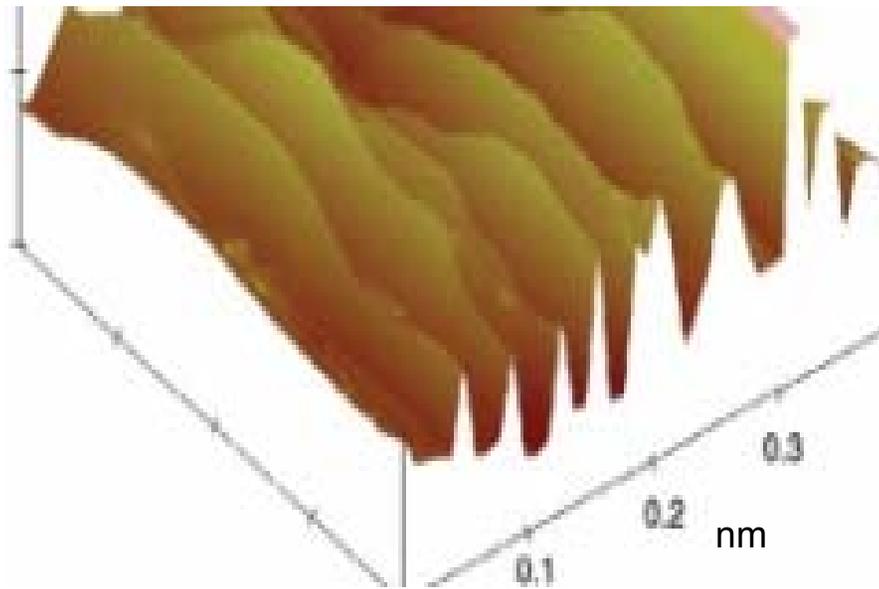
1 – 5 мВ/с

2 – 50 мВ/с

3 – 500 мВ/с

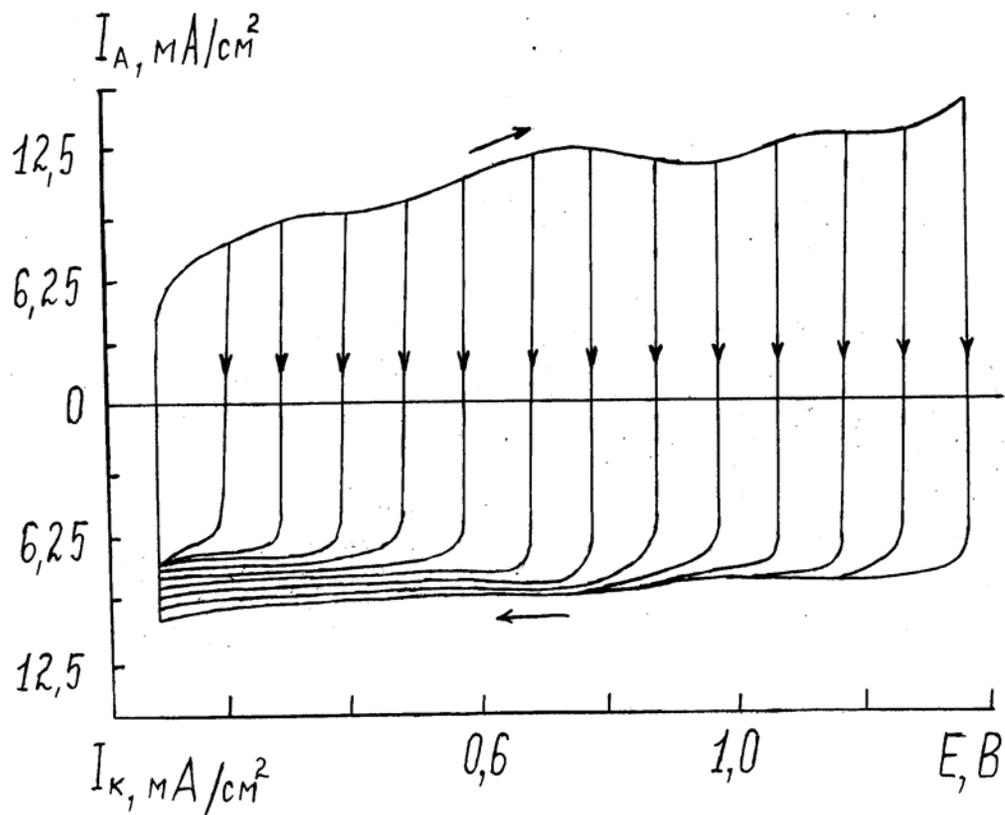
Е, В

# Структура графенов (ТЭМ)



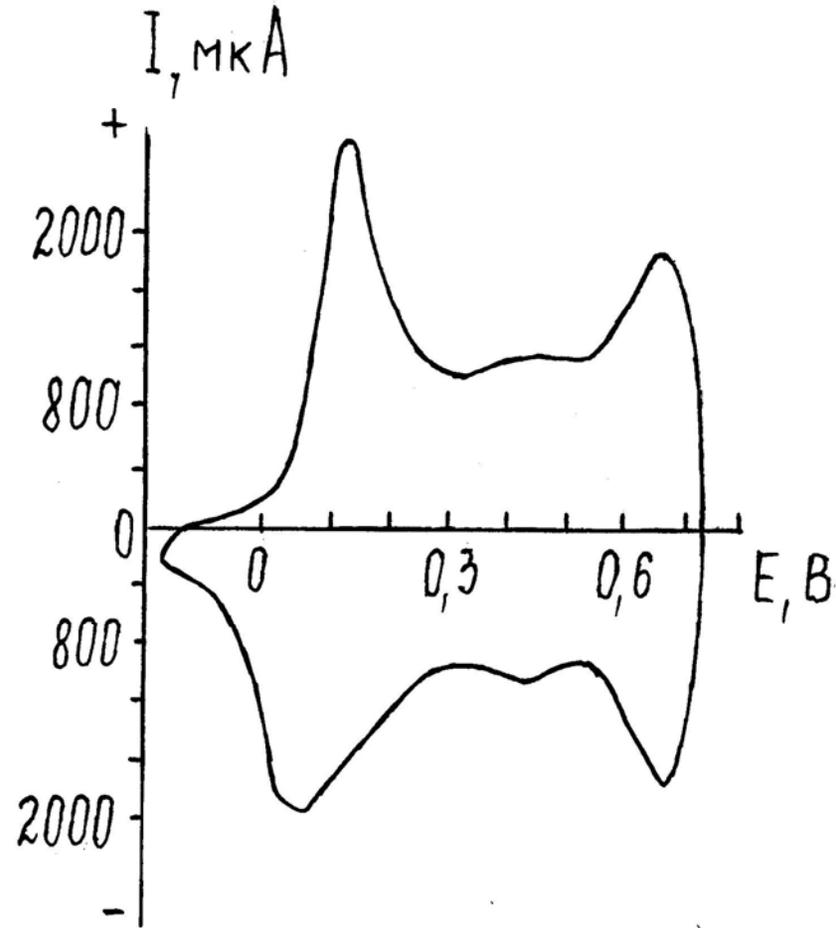
# Псевдоконденсаторы.

## Вольтамперограммы для плёнки $\text{RuO}_2$ в $1\text{M H}_2\text{SO}_4$



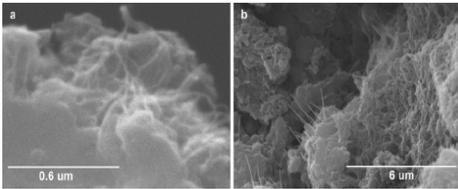
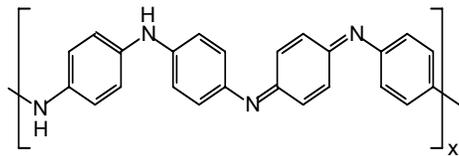
# Псевдоконденсаторы.

## Циклическая вольтамперограмма для полианилина в 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

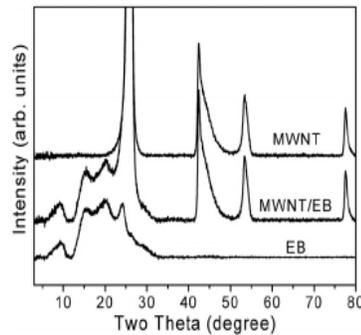


# Композитные ДСК-псевдоконденсаторы

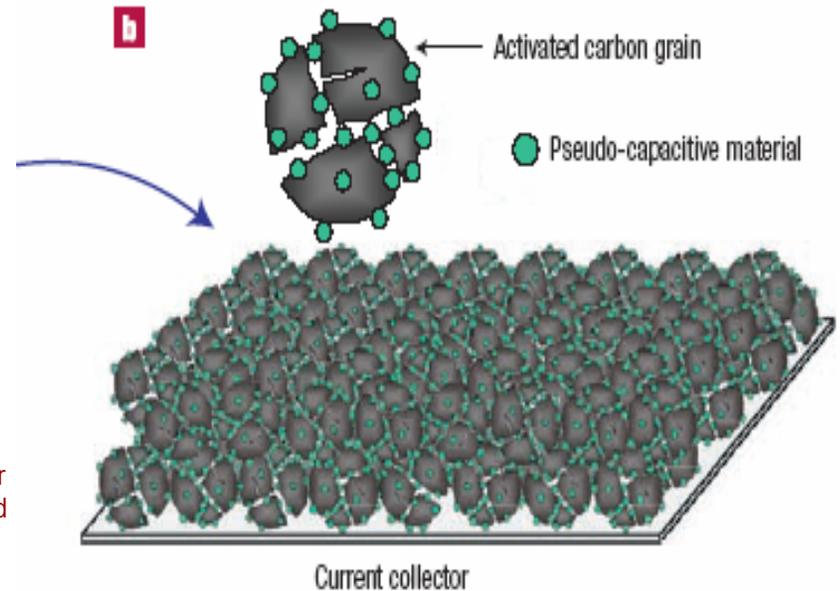
## Composite PAn- base – MWNT



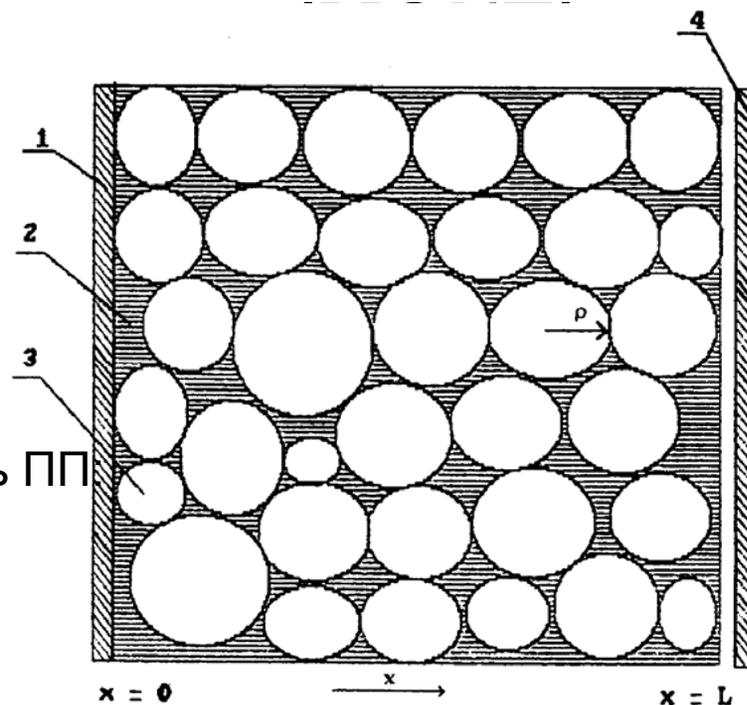
SEM images of powder of (a) pure EB powder and (b) EB-MWNT composite.



X-ray diffractograms of powder materials of EB, EB-MWNT and MWNTs.



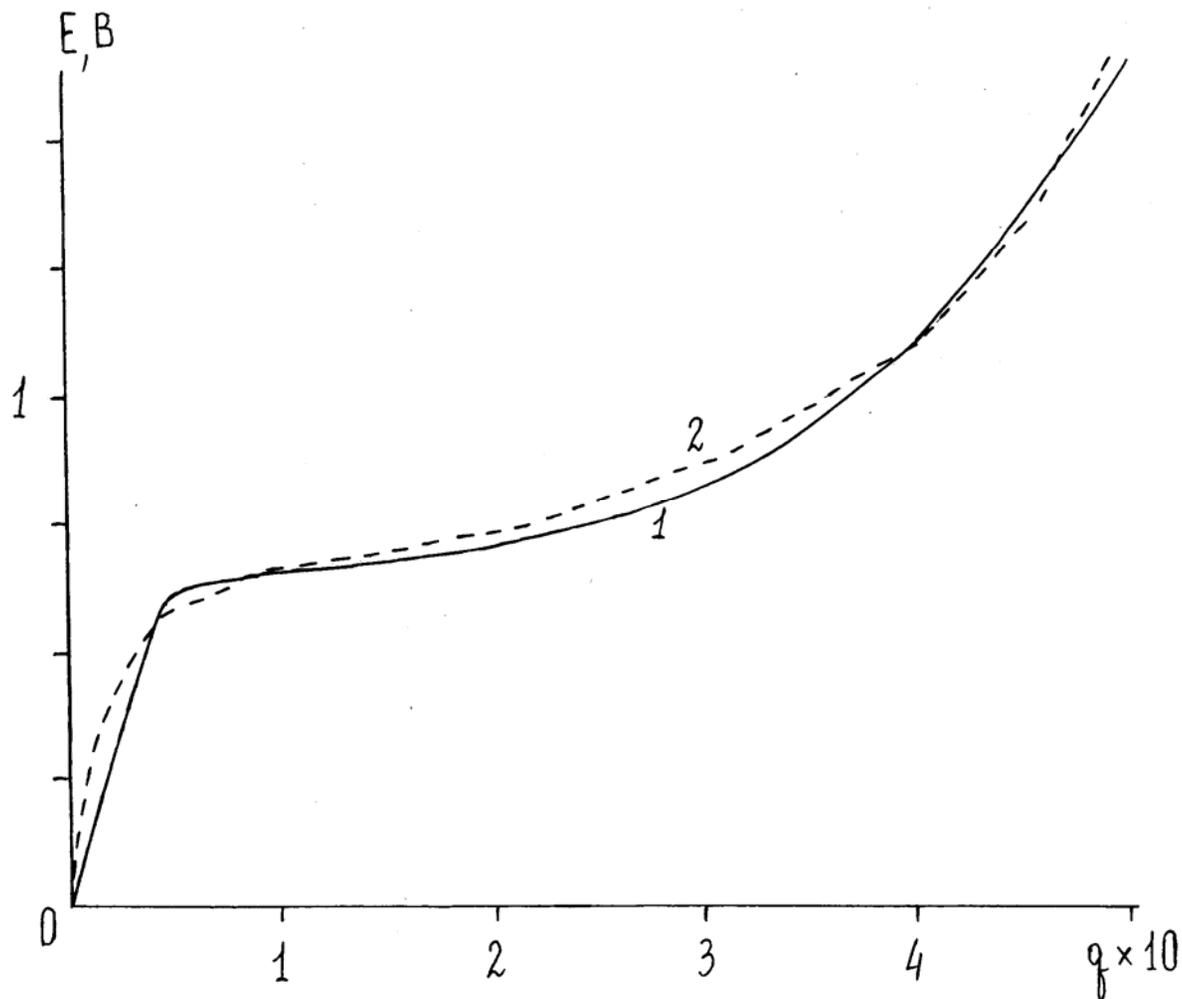
# Модель структуры псевдоконденсатора на основе электронпроводящих полимеров



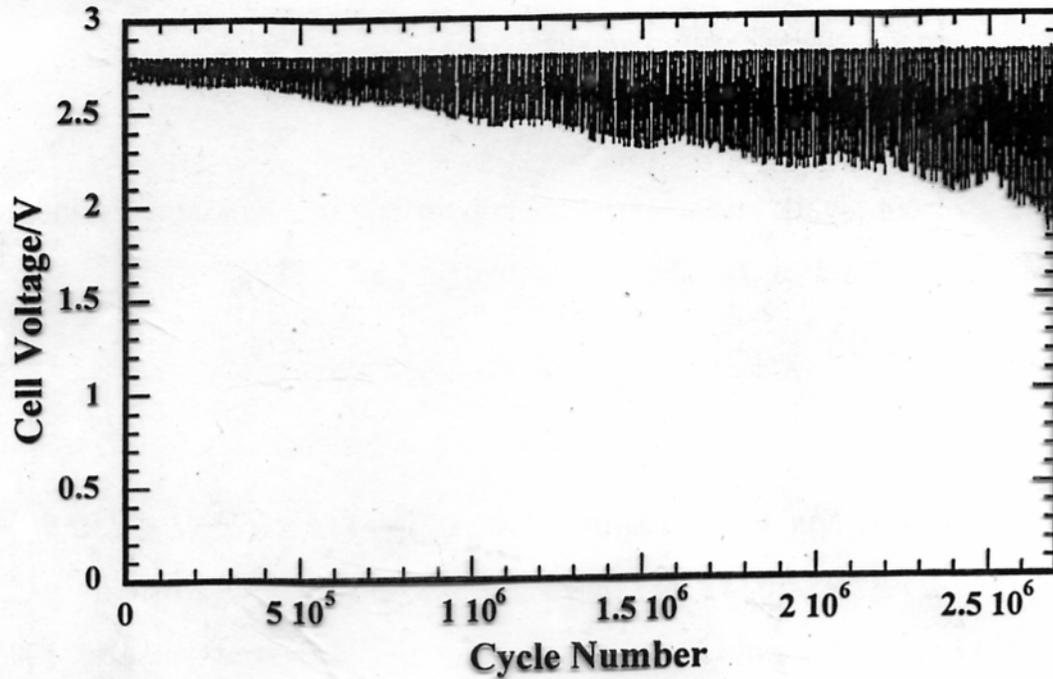
Удельная поверхность ПП  
100 – 500 м<sup>2</sup>/г

- 1- Электролит в порах
- 2 - Токоотвод
- 3- Волокна полимера

Сопоставление расчетной (1) и экспериментальной (2) разрядных кривых для соли ПАНВФ4 1 М Li BF4 в ГБЛ,  $I = 2 \text{ мА/ см}^2$ .

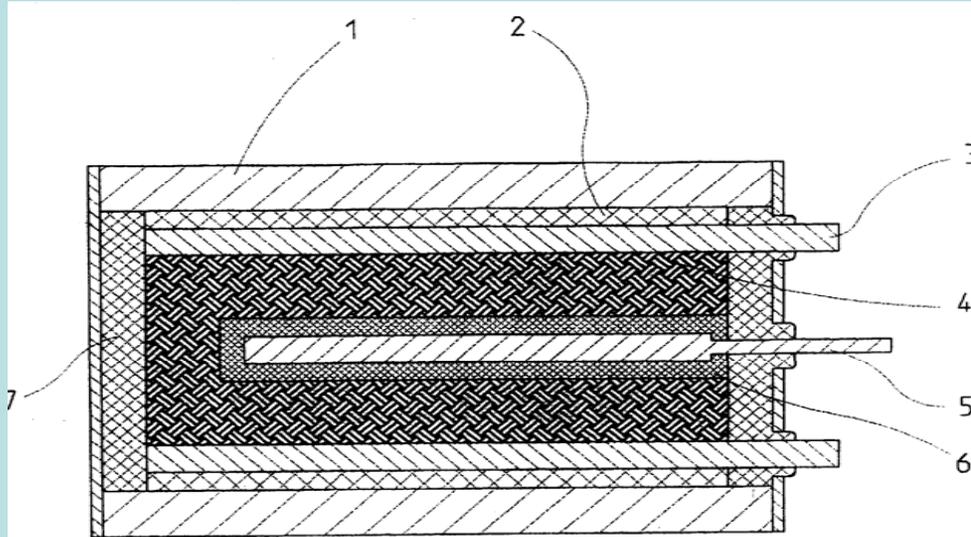


# Конденсатор на основе производных политиофена (Лос Аламосская лаб. США)



**Figure 4.** Pulsed discharge performance of a single-cell PFPT ultracapacitor: variation of cell voltage during  $2.7 \times 10^6$  cycles of 5 ms discharge pulse at  $100 \text{ mA/cm}^2$  followed by  $10 \text{ mA/cm}^2$  charging to 2.8 V and holding the voltage for 100 ms.

# Гибридный суперконденсатор: C/ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ PbSO<sub>4</sub> ЗАО «ИНКАР» - ИЭЛ РАН



- 3 - токоотвод отрицательного электрода,
- 4 - отрицательный электрод,
- 5 - положительный электрод,
- 6 - пористый сепаратор

# Основные характеристики гибридного конденсатора

ЗАО «ИНКАР» - ИЭЛ РАН

Удельная весовая энергоемкость: 15 – 20 Втч/кг.

Максимальное напряжение разряда: 2,2 В.

Внутреннее сопротивление: 3 – 5 мОм .

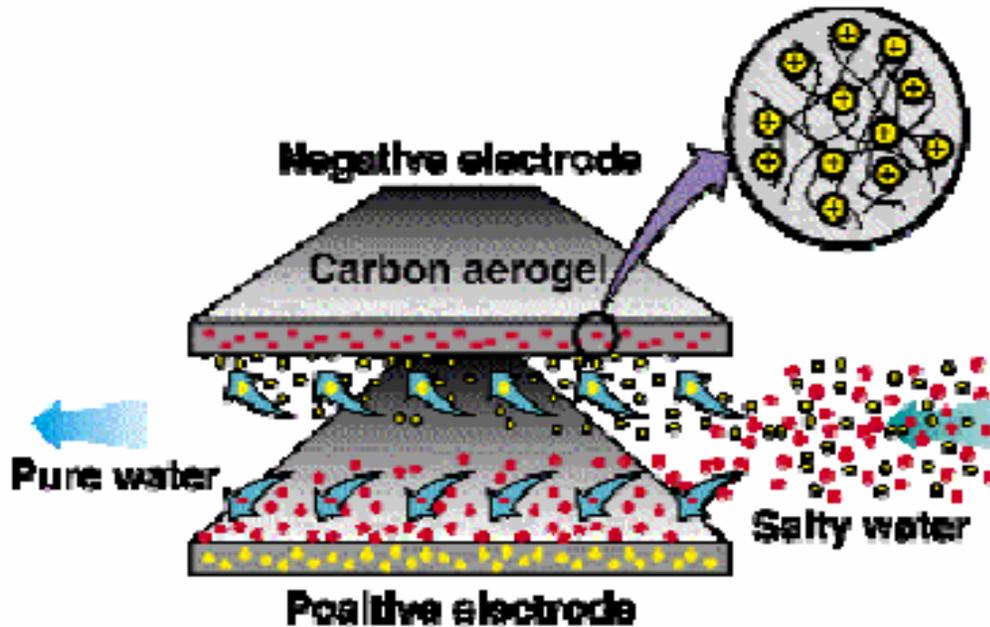
Циклический ресурс: 10000 циклов

Время заряда: 20- 30 мин.

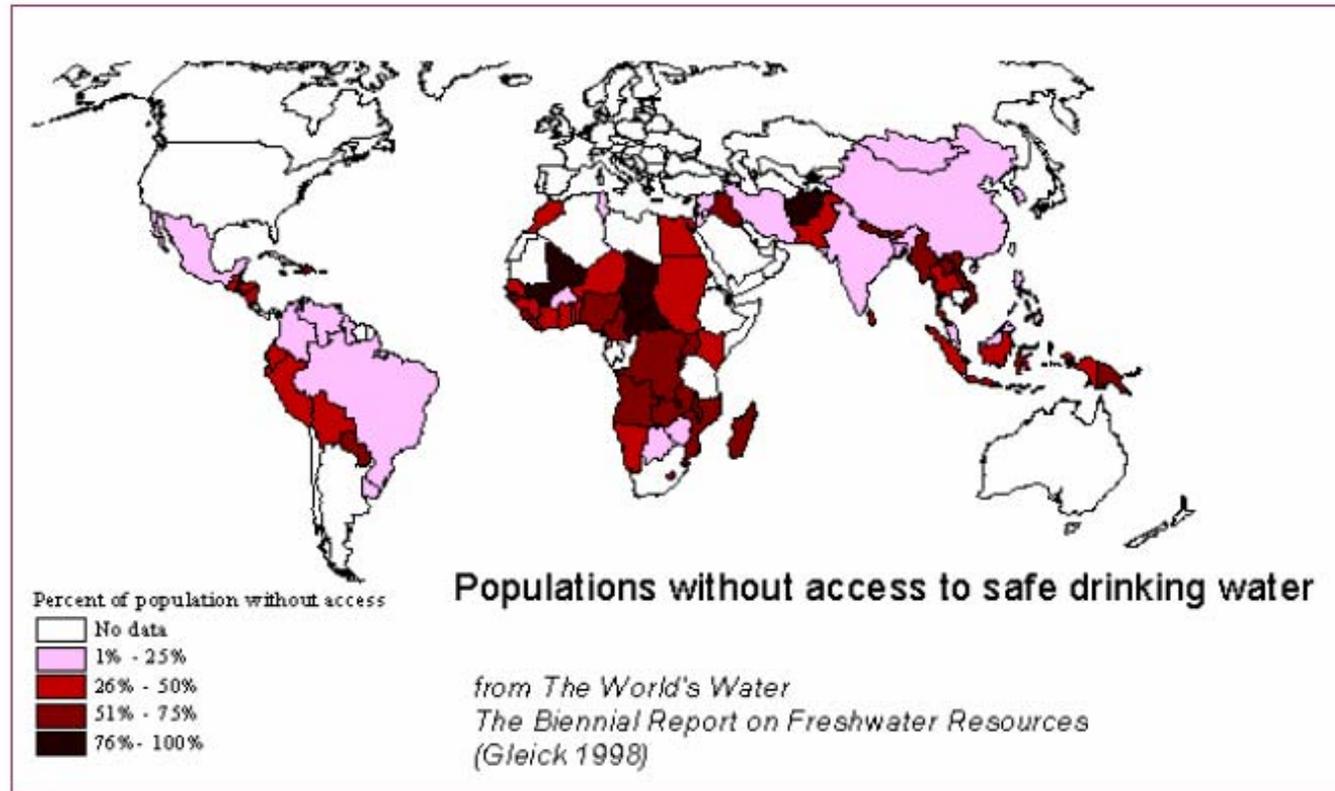
Диапазон рабочих температур:

-40 ÷ +60 °С

# Ёмкостной деионизационный метод опреснения и очистки ВОДЫ



# The Water Crisis

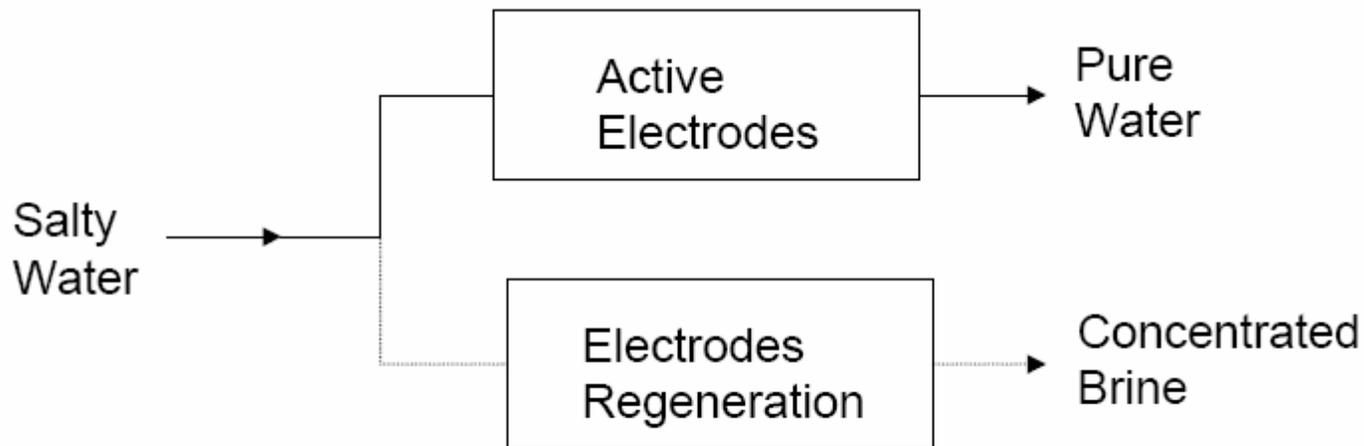


Serious shortages now in Middle East and Africa. World Bank projects 2.5 billion people by year 2025 will not have access to clean drinking water.

# Основные применяемые способы деионизации водных растворов:

- Дистилляция
- Электродиализ
- Обратный осмос

# Ёмкостное деионизационное обессоливание водных растворов



# Schematic representation of adsorption – regeneration capacitive deionisation set

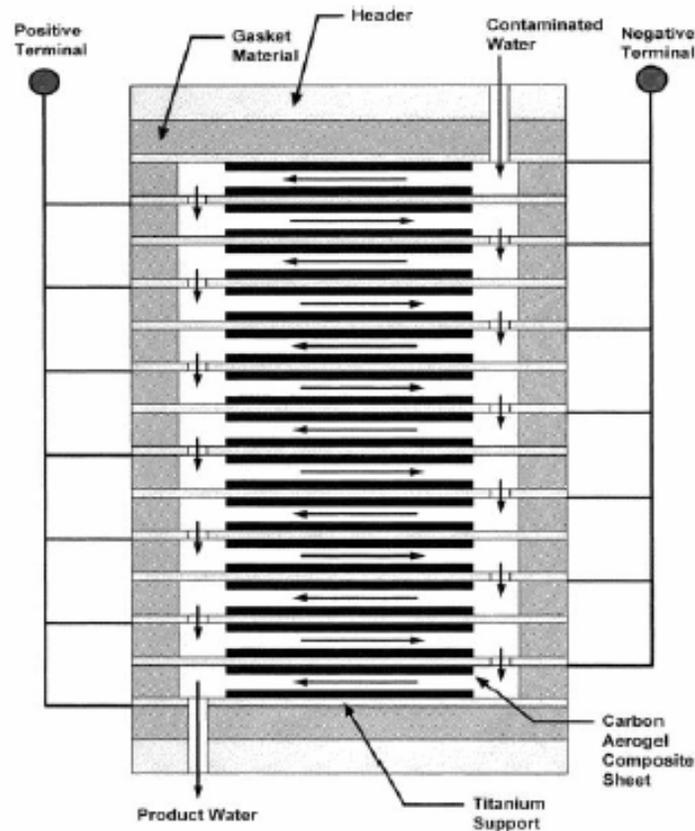
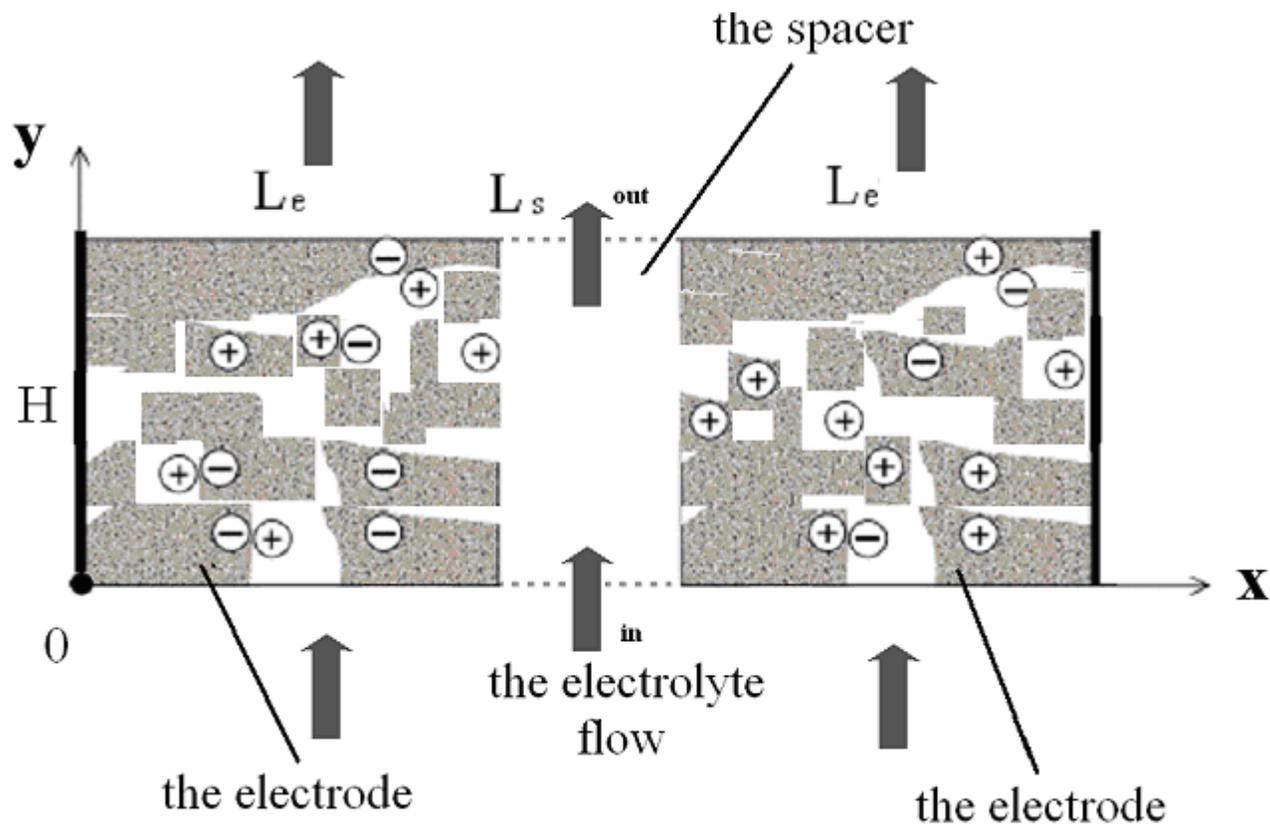


Fig. 12. Schematic representation of an electrochemical adsorption-regeneration cell. Reprinted with permission from Farmer et al. [48] and the American Chemical Society.

# Установка Samsung Electronics для деионизации водных растворов

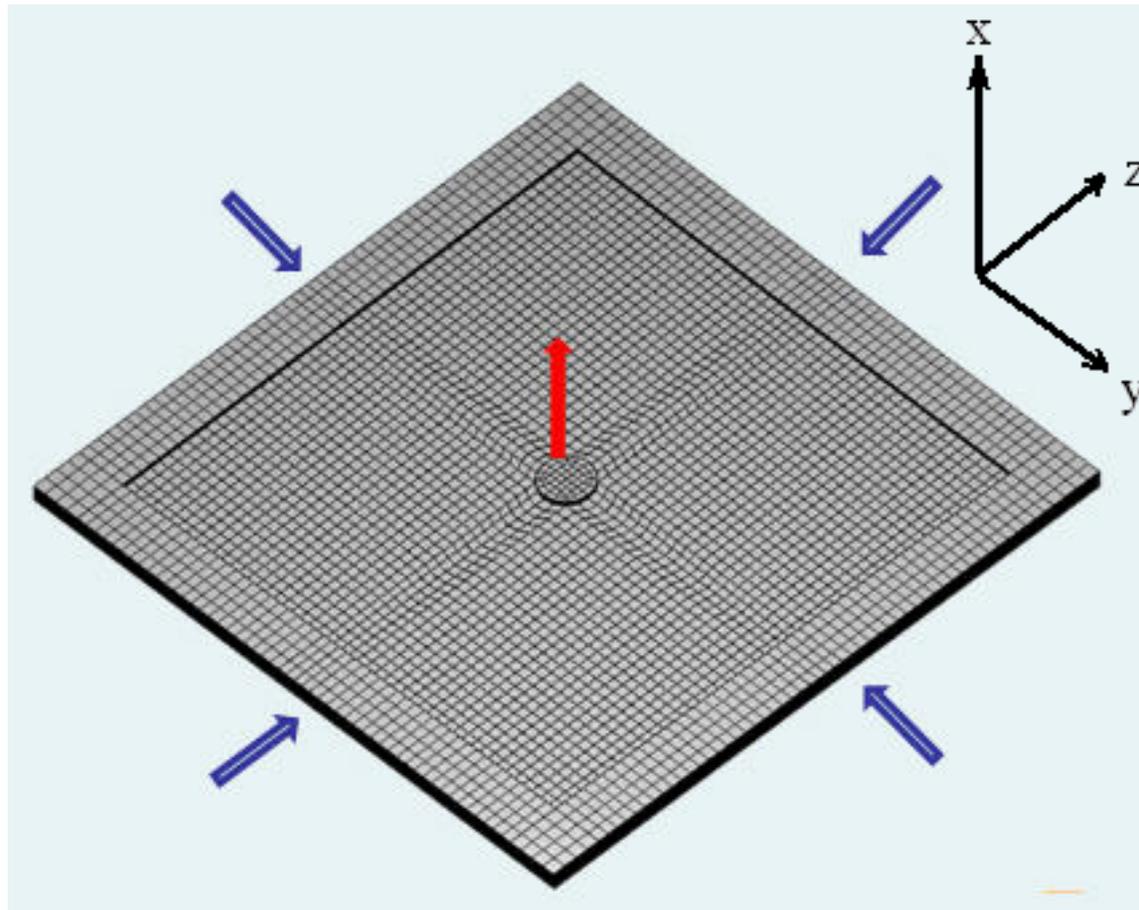


# Модель динамической ячейки для деионизации водных растворов

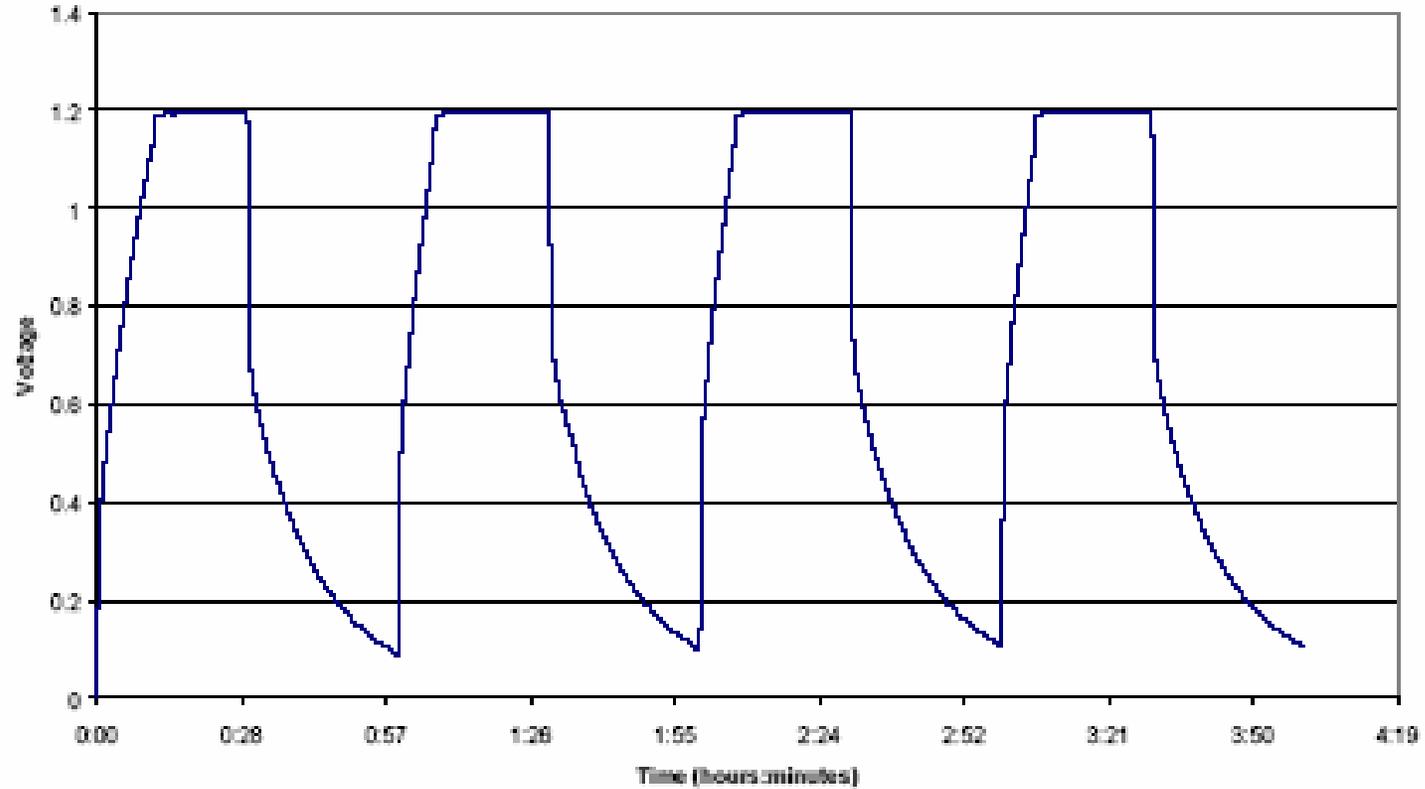


# Наша модель для деионизационной ячейки Samsung Electronics Co.

The model 2D



# Typical Charge-Discharge Curve



# Уравнения для динамической ячейки

$$C_s \frac{\partial \Phi - \Phi_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_E \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_E (t_+ - t_-) \frac{RT}{F} \frac{\partial \log c}{\partial x} \right)$$

$$\varepsilon_E \frac{\partial c}{\partial t} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = D_E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{C_s}{F} A_E \frac{\partial \Phi - \Phi_c}{\partial t} - k_A c$$

# Учет пористой структуры

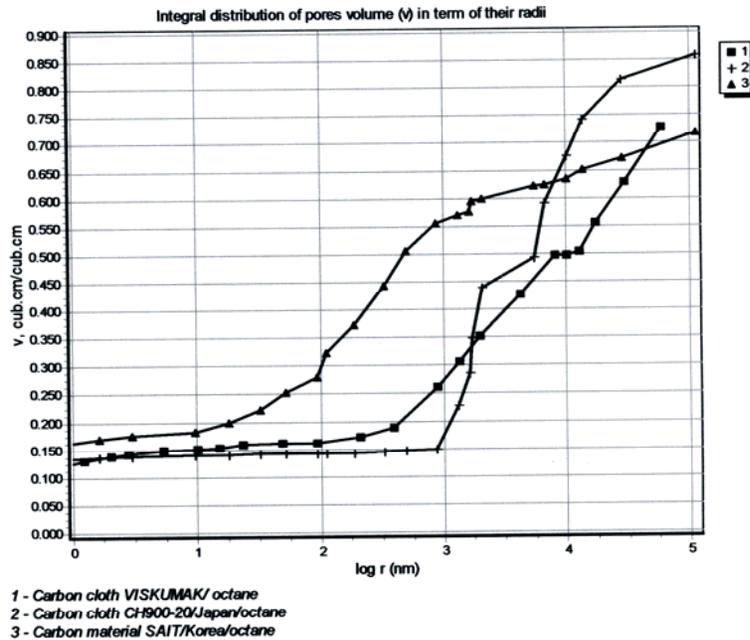


Fig. 1 Интегральные порограммы угольных электродов

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = D \Delta c - v \nabla c \dots \text{Электродсорб. ....}$$

$$\rho = \frac{1}{\mathcal{V}} \int \frac{d\mathcal{V}}{dr} r^2 dr$$

$$K = \xi \mathcal{V} \rho$$

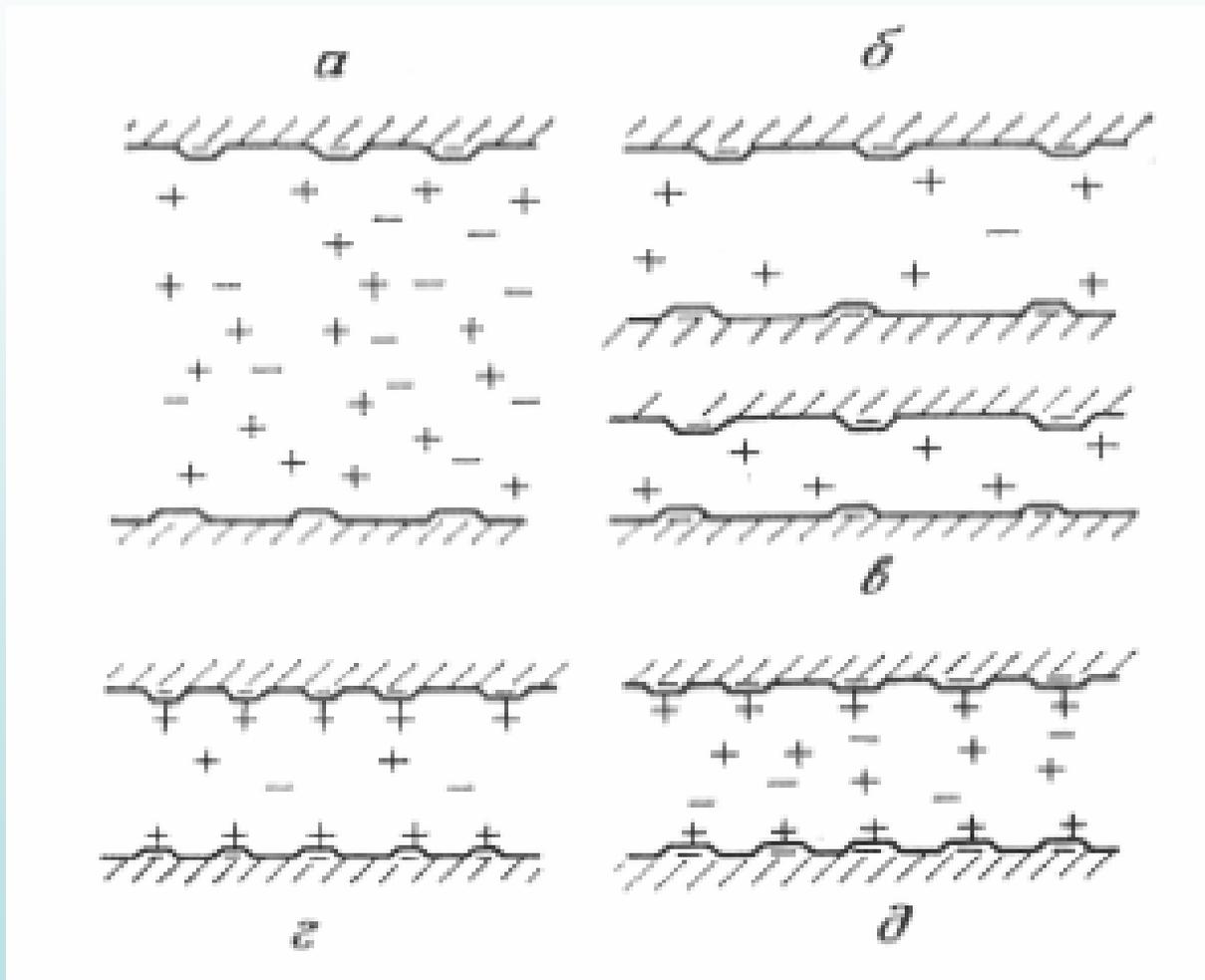
$$j_c = -c \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$k = \varepsilon^n k_0 \quad D = \varepsilon^n D_0$$

n=2 -3 ;

Соотношение Арчи

# Двойной электрический слой в порах разных диаметров



# Ионная электропроводность в порах электродов

$$K = K_v (C) + SK_s \quad (1)$$

$K$  - суммарная ионная электропроводность в порах

$K_v (C)$  - электропроводность ионов в объеме поры

$C(x,y,t)$  – концентрация ионов в объеме поры

$S$  – удельная поверхность

$K_s$  - поверхностная проводимость = продольная электропроводность ДЭС

$$K_s = K_{SG} + K_s (E) \quad (2)$$

$K_{SG}$  - поверхностная проводимость поверхностных групп

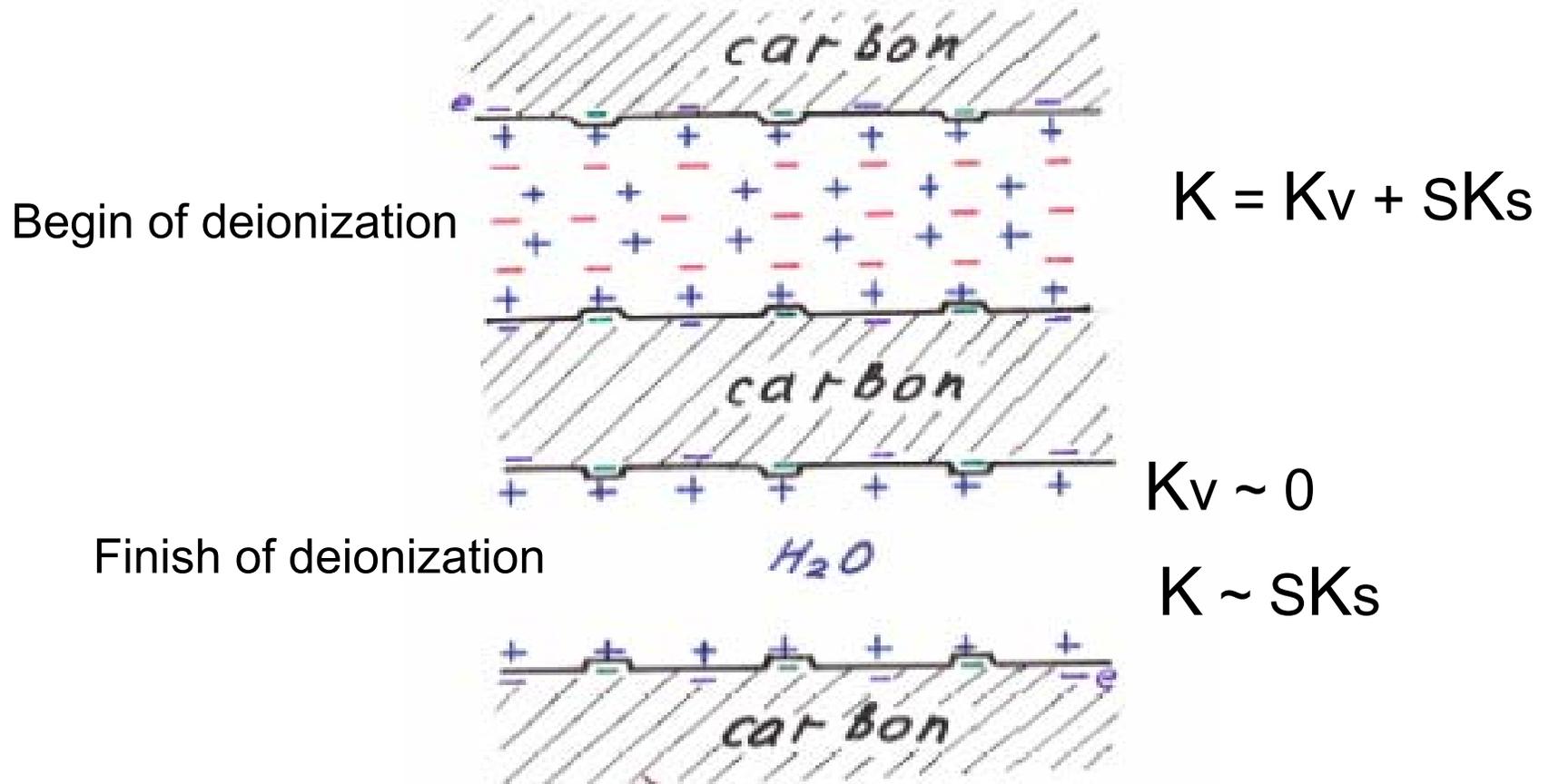
$K_s (E)$  - продольная электропроводность ДЭС, обусловленная электростатикой

$$\text{При } C = 0 \quad K = SK_s \quad (3)$$

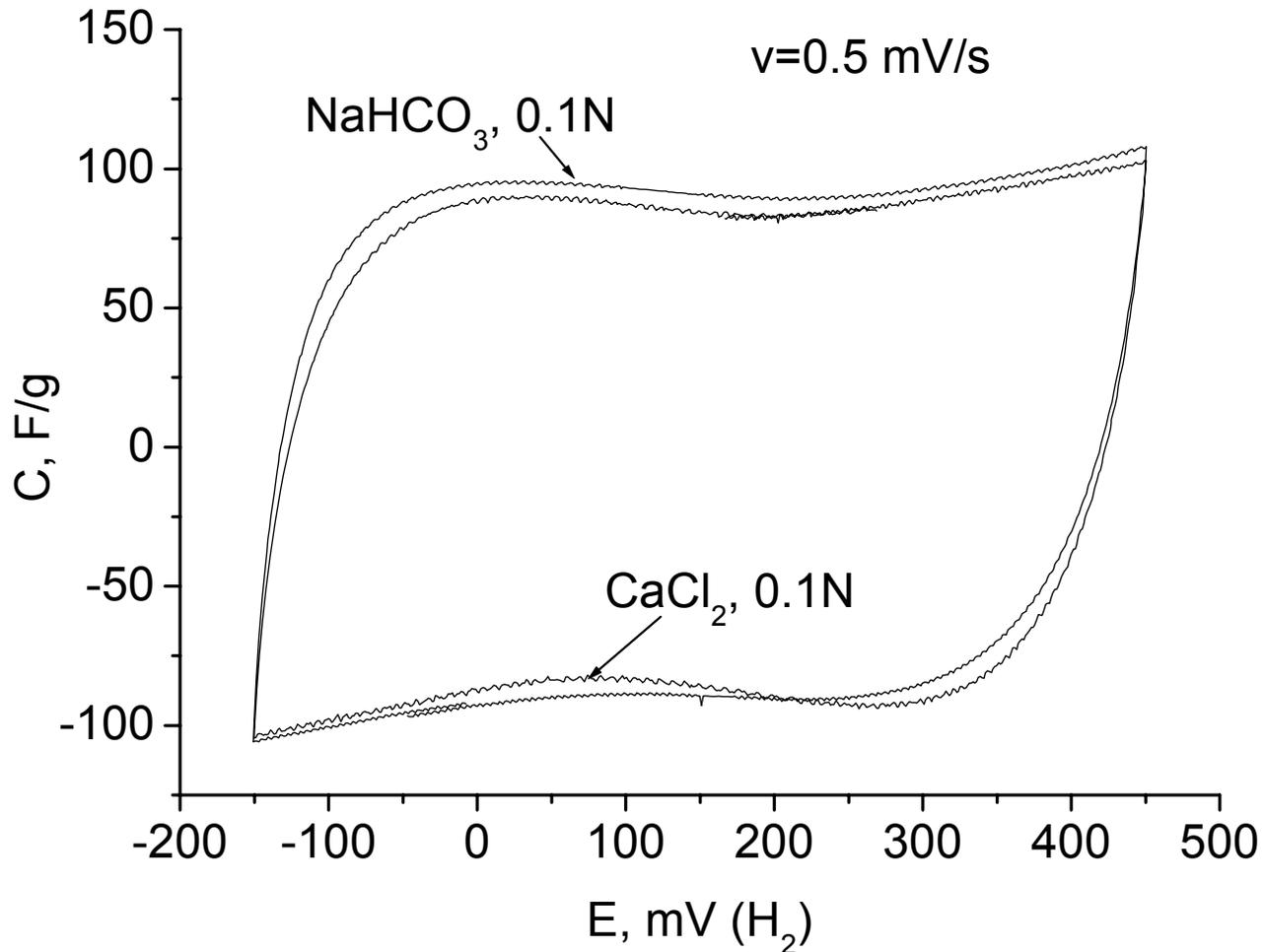
Conductivity of a solution in pores is a sum of volume and surface conductivity. The surface conductivity  $K_s$  is a longitudinal conductivity of EDL:  $K = K_v + SK_s$ .

$K_v = nC$ ,  $C$  – ion concentration,  $S$  – surface area

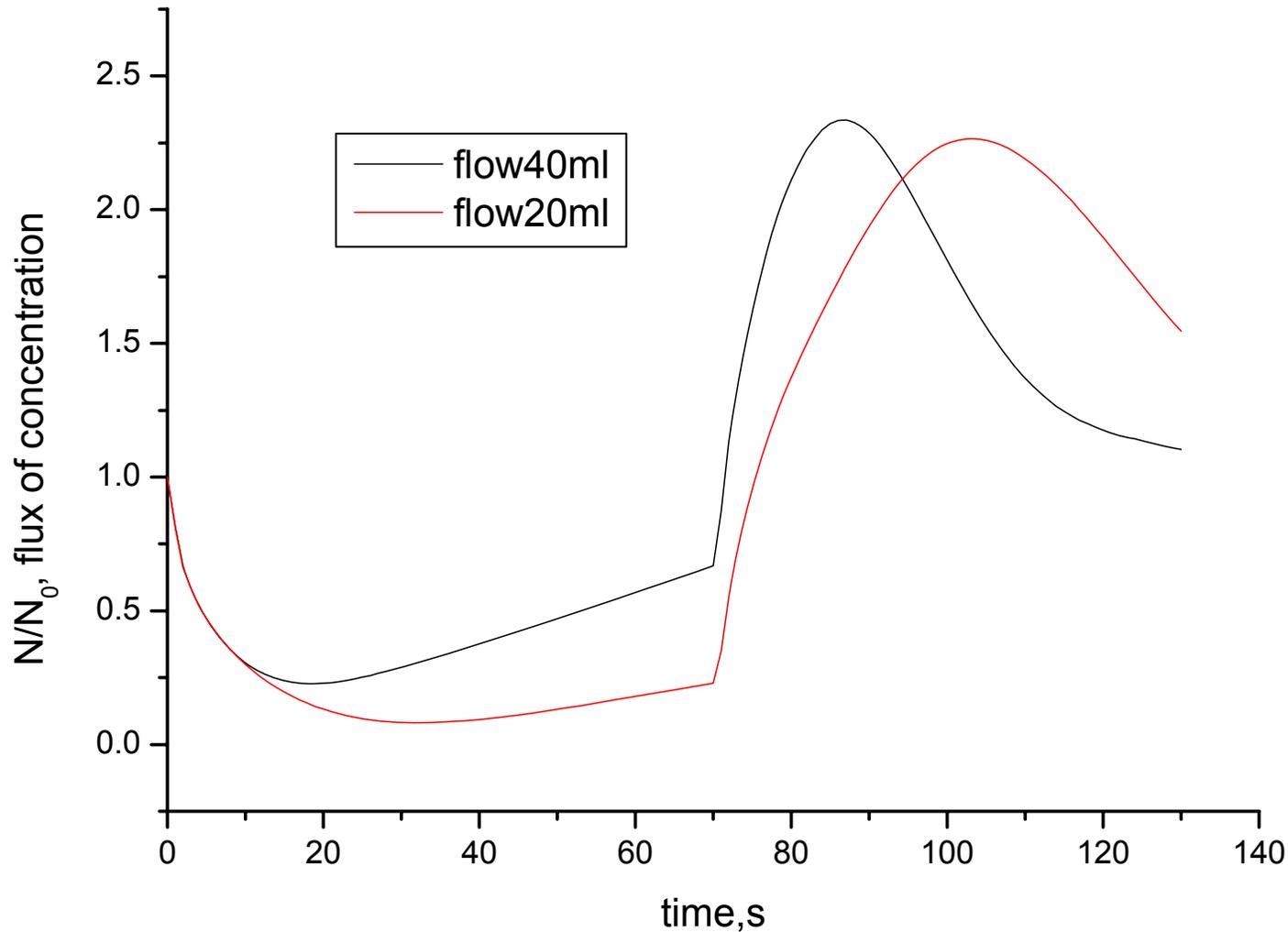
In end of deionization process  $K_v \sim 0$  and  $K \sim SK_s$



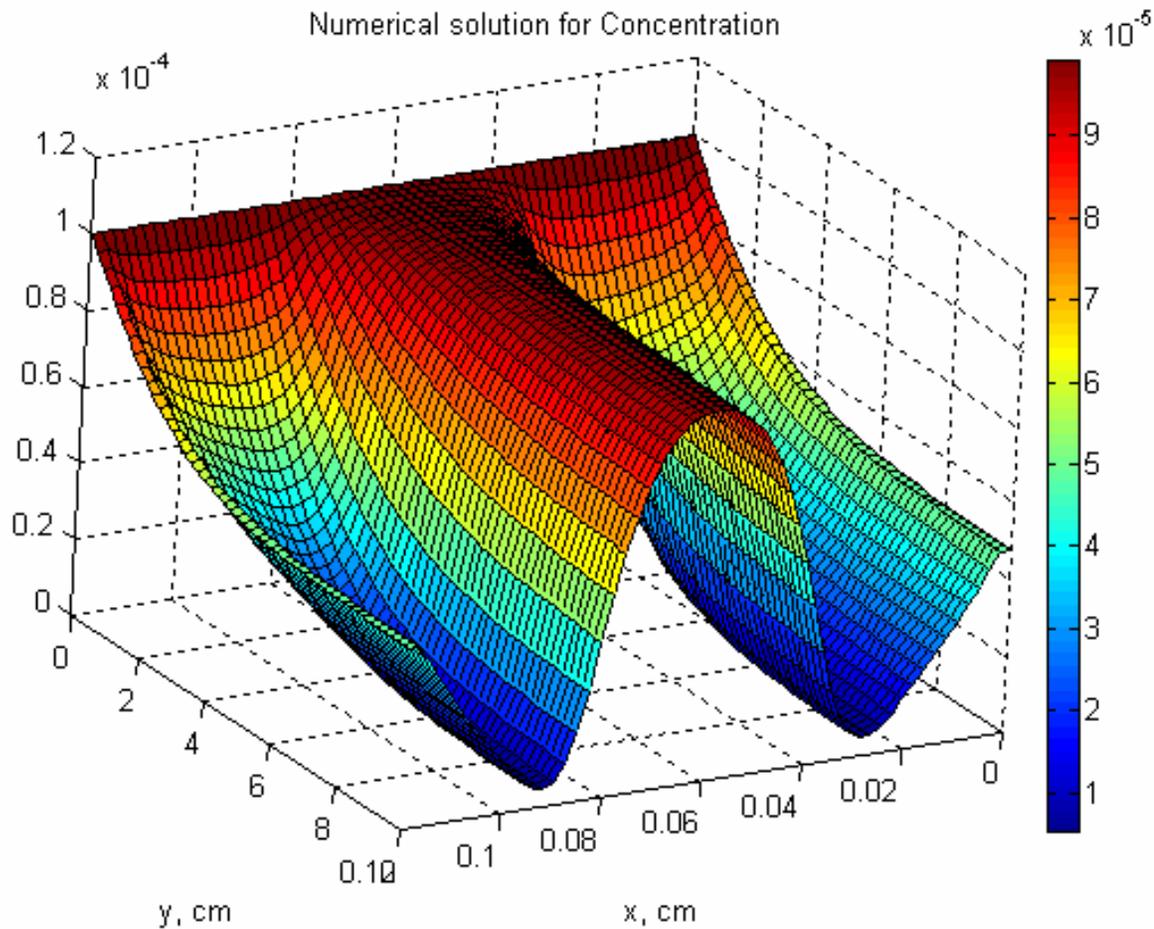
# Циклические вольт-фарадные кривые. Зависимости емкости ДЭС от потенциала



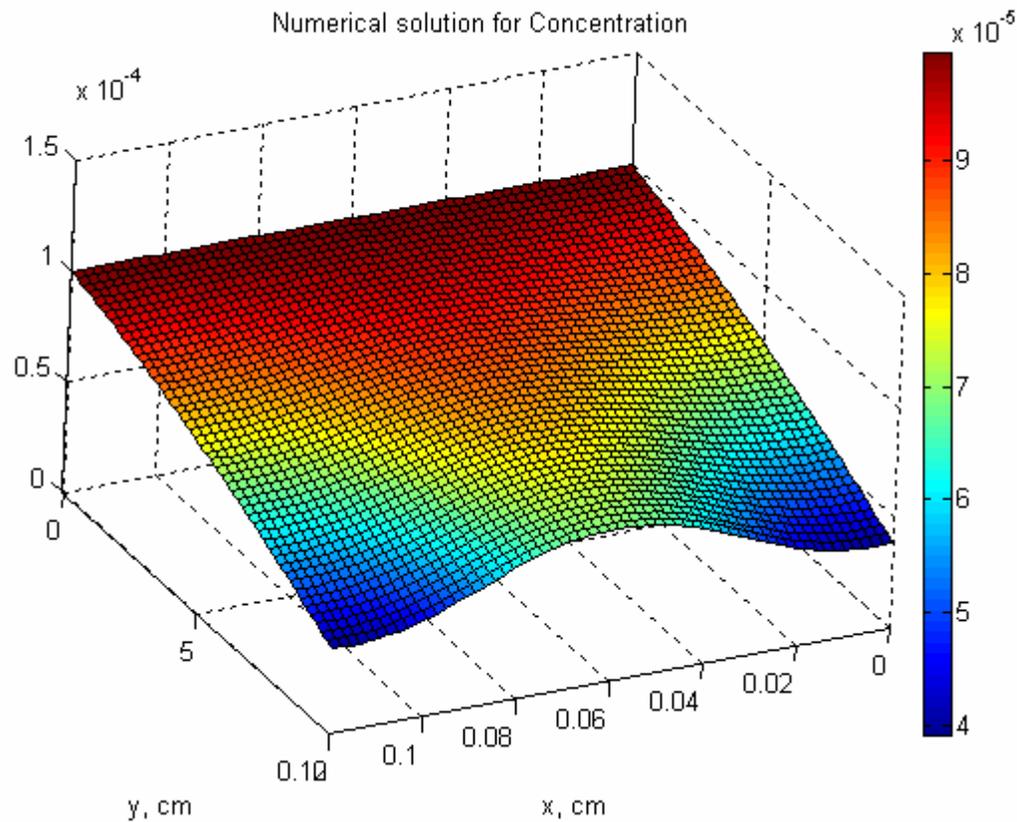
# Изменение средней концентрации раствора в процессе стадий адсорбции и десорбции ионов



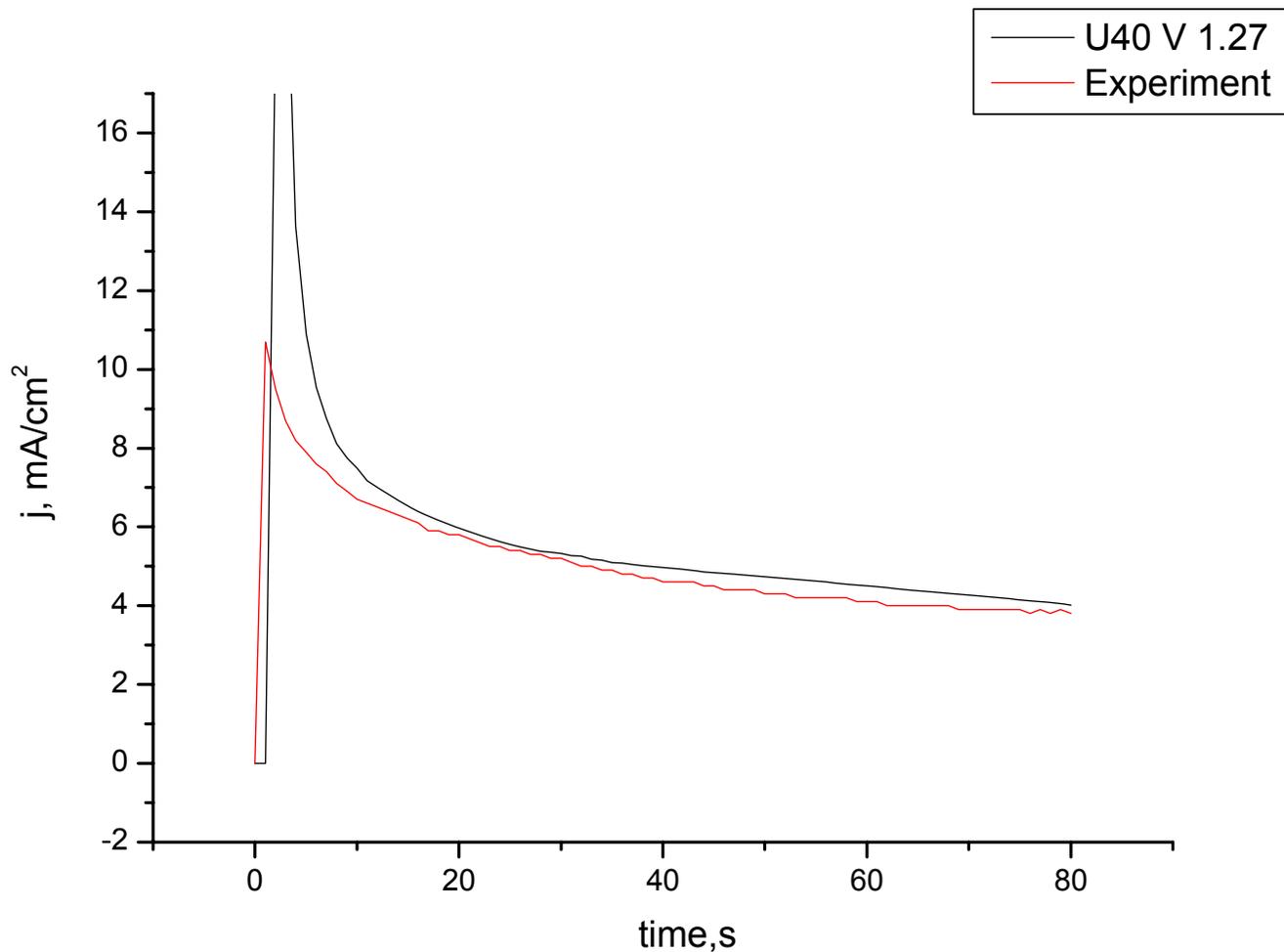
# Concentration field ( $v=0.2$ cm/s, $L_s=0.04$ cm, $T=5$ s)



# Concentration field ( $v=0.2$ cm/s, $L_s=0.04$ cm, $T=99$ s)



# Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей тока от времени адсорбции



# Composition of water solution

$\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$

Average concentrations :  
from 0.01N до 0.0002 N

Specific conductivity:  
from 1.9 to 0.04 mS/cm

## Список основных публикаций и соавторов

1. Ю.М. Вольфкович, В.М. Мазин, Н.А. Уриссон, Электрохимия, 34 (1998) 825.
2. Yu.M. Volfkovich, P. Shmatko, US Patent 6,628,504 (2003).
3. Ю.М. Вольфкович, Т.М. Сердюк, Электрохимия, 38 (2002) 1043.
4. Ю.М. Вольфкович, И.А. Блинов, В.Е. Сосенкин, Патент РФ № 1686918 (1999).
5. Yu.M.Volfkovich, A.Yu. Rychagov, N.A. Urisson, P.A. Shmatko, US Patent 6,706,079 (2004).
6. Yu.M. Volfkovich, V.S. Bagotzky, V.E. Sosenkin, In: Colloid and Surfaces. 187 (2001) 349.
7. A. I. Belyakov, Yu.M. Volfkovich, at al., US Patent 6,195,252 B1 ( 2001).
8. V.I. Vasechkin, Yu.M. Volfkovich, P.A. Shmatko at al., US Patent 6,335,858 (2002).
9. V.I. Vasechkin, Yu.M. Volfkovich, P.A. Shmatko, US Patent 6,426,862 (2002).
10. Yu. M. Volfkovich, A. G. Sergeev, T. K. Zolotova, S.D. Afanasiev, O.N. Efimov, E.P. Krinichnaya, Electrochimica Acta, 44 (1999) 1543.
11. Yu. M. Volfkovich, I.A. Blinov, V.E. Sosenkin, US Patent 6,298,711, 2001.
12. Yu. M. Volfkovich, P. Shmatko, US Patent 6,466,429 (2002).
13. Y. M. Volfkovich, A.Y. Rychagov, N. A. Urisson, T. M. Serdyuk. US Patent No. 7,006,346.
14. Y.M. Volfkovich, A.V. Sakars, A.A. Volinsky. International Journal of Nanotechnology (IJNT), Volume 2 , Issue 3, 2005, p.192-302.
15. Yu. M. Volfkovich, I.A. Blinov, V.V., V.E. Sosenkin, CA Patent 2276380, 2000.
16. Yu. M. Volfkovich, I.A. Blinov. CA Patent 2473293, 2005.
17. V.I. Vasechkin, Yu.M. Volfkovich, P.A. Shmatko, O.G. Dashko. EP 1043743, 2006.
18. А.Ю. Рычагов, Ю.М. Вольфкович, Электрохимия. 44 (2008) 1343.
19. А.Ю. Рычагов, Ю.М. Вольфкович, Электрохимия, 43, (2007) 1273.
20. Ю.М. Вольфкович, Т.М. Сердюк, Электрохимическая энергетика, 1 (2001) 14
21. Ю.М. Вольфкович, А.Ю. Рычагов, В.Е.Сосенкин, А.В. Крестинин, Электрохимическая энергетика, 8 (2008) 106.
22. Y. Volfkovich, D.A. Bograchev, A.Y. Rychagov, D. Park. Book of Intern. Membrane Conference. Tuapse. 2009.
23. О.А. Хазова, Н.А. Майорова, Е.К. Тусеева, Ю.М. Вольфкович, В.Е. Сосенкин, А.В. Крестинин, Г.И. Зверева, Электрохимия 45 (2009)

***БЛАГОДАРЮ  
ЗА ВНИМАНИЕ !***