

### ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ З ОПТИМАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ ПОР ЗА РОЗМІРАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОДІВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

**В. Ю. Ізотов<sup>1,2</sup>, Д. С. Гавриков<sup>1,2</sup>, І. В. Кольцов, А. В. Селихова, М. І. Клюй<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут фізики Дзилінського університету  
вул. Цяньдзін, 2699, м. Чанчунь, 130012, КНР. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**О. Є. Беляєв, І. М. Бурлака, Д. О. Ярмоленко**

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В.С.Лашкарьова НАН України  
просп. Науки, 41, м. Київ, 03028, Україна. E-mail: belyaev@isp.kiev.ua

Запропоновано підхід який дозволяє змінювати пористу структуру вуглецевого матеріалу, що в кінцевому рахунку призводить до збільшення питомої енергоємності суперконденсатора. Одним з основних недоліків сучасних суперконденсаторів вважається їх низька, порівняно з акумуляторами, питома енергоємність. Для кращих зразків суперконденсаторів вона змінюється в межах від 4 до 6 Вт\*год/кг. Пошук шляхів збільшення енергоємності є одним з актуальних завдань сучасної енергетики. Одним з перспективних напрямків, що дозволяє покращити параметри суперконденсаторів, є пошук оптимальної пористої структури вуглецевих матеріалів, які використовуються при виготовленні електродів. На прикладі електрохімічної системи пористий вуглецевий електрод/органічний електроліт показано, що максимальна ємність досягається тоді, коли пори вуглецевого матеріалу стають однаково доступні як для катіонів так і для аніонів. Показано, що не тільки площа пори, але і зовнішня поверхня частинок вуглецевого порошку, з якого виготовляють електроди, суттєво впливає на ємність суперконденсатора.

**Ключові слова:** суперконденсатор, пористий вуглецевий матеріал, питома енергоємність.

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА С ОПТИМАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОР ПО РАЗМЕРАМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

**В. Ю. Изотов<sup>1,2</sup>, Д. С. Гавриков<sup>1,2</sup>, И. В. Кольцов, А. В. Селихова, Н. И. Клюй<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Дзилінського університета  
ул. Цяньдзін, 2699, Чанчунь 130012, КНР. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**А. Е. Беляев, И. М. Бурлака, Д. А. Ярмоленко**

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины  
просп. Науки, 41, г. Киев, 03028, Украина. E-mail: belyaev@isp.kiev.ua

Предложен подход позволяющий менять пористую структуру углеродного материала, что в конечном счете приводит к увеличению удельной энергоёмкости суперконденсатора. Одним из основных недостатков современных суперконденсаторов считается их низкая, по сравнению с аккумуляторами, удельная энергоёмкость. Для лучших образцов суперконденсаторов она изменяется в пределах от 4 до 6 Вт\*час/кг. Поиск путей увеличения энергоёмкости является одной из актуальных задач современной энергетики. Одним из перспективных направлений, которое позволяет улучшить параметры суперконденсаторов, является поиск оптимальной пористой структуры углеродных материалов, которые используются при изготовлении электродов. На примере электрохимической системы пористый углеродный электрод/органический электролит показано, что максимальная ёмкость достигается тогда, когда поры углеродного материала становятся одинаково доступны как для катионов так и для анионов. Показано, что не только площадь поры, но и поверхность углеродного порошка, из которого изготавливают электроды, оказывает существенное влияние на ёмкость суперконденсатора.

**Ключевые слова:** суперконденсатор, пористый углеродный материал, удельная энергоёмкость.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Останнім часом з'явився підвищений інтерес до перезаряджуваних систем, що здатні акумулювати значну електричну енергію, а при необхідності віддавати її на зовнішнє навантаження у вигляді потужних імпульсів. Тривалість імпульсів повинна сягати кількох секунд при потужності декілька кіловат. Такі системи знаходять усе більш широке використання в системах зв'язку, в автомобільній промисловості та в космічній техніці.

Технічне вирішення зазначеної проблеми в першу чергу пов'язують з використанням електрохімічних конденсаторів подвійного електричного шару або, як їх інакше називають, суперконденсаторів (СК). За своїми питомими характеристиками СК не мають собі рівних при роботі в високопотужних імпульсних системах. Питома енергоємність СК

сягає декількох ват-годин на кілограм, а питома потужність в імпульсному режимі – декілька десятків кіловат на кілограм. Передача енергії здійснюється при значеннях ККД не менше 90%. Накопичувачі, в основу яких покладені СК, можуть працювати в широкому інтервалі температур. Вони не бояться короткого замикання. СК можуть витримувати понад  $10^5$  циклів заряд/розряд не змінюючи своїх параметрів [1–3].

В даній роботі розглядаються симетричні СК в яких при заряді на обох електродах утворюється подвійний електричний шар. В цьому шарі і відбуваються процеси заряду та розряду [4]. Електроди таких СК зазвичай виготовляють з пористого вуглецевого матеріалу. Питома ємність подвійного електричного шару для вуглецевих матеріалів складає приблизно  $10 \text{ мкФ/см}^2$  [5], а питома поверхня пори-

стих вуглецевих матеріалів перевищує  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ . Велика питома поверхня і визначає високу питому ємність симетричних СК. Крім того структура пор визначає як ємнісні характеристики суперконденсатора, так і в значній мірі визначає його внутрішній опір [6–9]. З огляду на це, вивчення та удосконалення структури вугільних матеріалів постає актуальним завданням.

Окрім високої питомої поверхні активовані матеріали повинні: а) мати високу електропровідність; б) мати розмір пор доступний для іонів електроліту; г) бути хімічно інертними до компонент електроліту; д) бути стабільними в широкому діапазоні температур [10].

Для того, щоб пори вуглецевого матеріалу були доступні для іонів та молекул розчинників найпоширеніших неорганічних електролітів (на основі ацетонітрилу, пропіленкарбонату та  $\gamma$ -бутиролактону) їх розмір повинен бути більше 1 нм. На практиці цій вимозі відповідають матеріали, в яких розмір пор змінюється у межах від 1 до 4 нм [11].

Цілеспрямований науковий пошук нових пористих вуглецевих матеріалів для СК триває. Але не зважаючи на значні успіхи, які були досягнуті в цьому напрямку, залишаються невизначеними наступні питання: яку максимальну питому ємність можуть мати вуглецеві матеріали та який параметр визначає питому ємність пористого вуглецевого матеріалу. Такими параметрами можуть бути загальна питома площа поверхні та питома площа поверхні пор розмір яких більше 1 нм.

Метою даної роботи було встановлення зв'язку між структурою пористого вуглецевого матеріалу і ємністю електрохімічної системи вуглецевий електрод/органічний електроліт. Також необхідно експериментально визначити структуру пористого вуглецевого матеріалу, яка є оптимальною для того щоб отримати максимальну питому ємність зазначеної вище електрохімічної системи.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для вирішення поставленої задачі було обрано вуглецевий матеріал з великою кількістю пор, розмір яких був менший 1 нм. В подальшому проводилась додаткова активація вихідного матеріалу, що приводило до збільшення пор, розмір яких був більший 1 нм. Паралельно з процесом активації проводились електрохімічні виміри питомої ємності активованого матеріалу. Процес активації продовжувався до тих пір, поки зі збільшенням кількості пор з діаметром більшим за 1 нм не припинялось збільшення питомої ємності.

При виборі вихідних матеріалів основна увага зверталась на їх порсту структуру. Перевага віддавалась вуглецевим матеріалам з мікропористою структурою. Спираючись на цей критерій, в якості вихідних матеріалів було обрано пористі вуглецеві порошки, що використовуються для очистки води виробництва фірми «Filtrosorb Chemviron Carbon» марки F300. За своїм гранулометричним складом розмір частинок вихідного порошку знаходився в межах від 10 до 20 нм.

На рис. 1 наведено розподіл пор за розмірами для вихідного порошкового вуглецевого матеріалу. Результати по пористості, наведені на рис. 1 і на всіх інших рисунках в даній роботі були отримані за допомогою приладу ASAP2000M фірми Micromeritics. Розподіл пор за розмірами визначався з ізотерм адсорбції-десорбції азоту при температурі 77 К та розраховувався за методикою BET.

В даній роботі модифікування пористої структури вуглецевого матеріалу проводилось шляхом обробки його лугами (KOH).

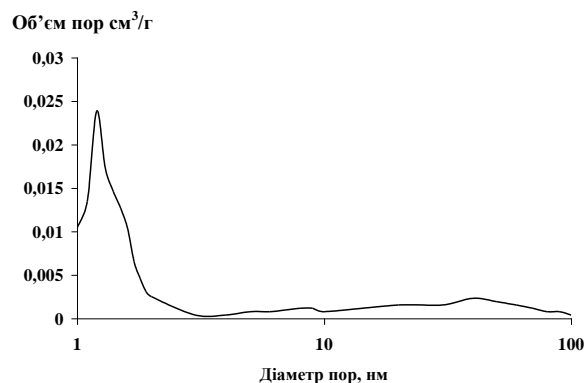


Рисунок 1 – Розподіл пор за розмірами для пористого вуглецевого матеріалу «Filtrosorb Chemviron Carbon» марки F300

Ступінь активації залежить від вагового співвідношення між лугами та вуглецевим матеріалом, який піддається активації. При проведенні експериментів з активації вугілля вагові співвідношення вугілля та луку приймали наступні значення - 1:0,25; 1:0,5; 1:1; 1:2; 1:3; 1:4. Для рівномірного перемішування лугів з вуглецевого матеріалу при малих концентраціях використовувались водні розчини лугів концентрації 25%, 50%. Розчини лугів, з метою вилучення з них  $\text{CO}_2$ , кип'ятили протягом однієї години в атмосфері аргону. Потім цей розчин змішували з пористим вуглецевим матеріалом і одержану суміш висушували при температурі  $20^\circ \text{C}$  до постійної ваги. Під час висушування ємність з сумішню відкачувалась за допомогою водоструменевого насоса. Після цього суміш поміщали в човник, виготовлений з електрохімічно стійкого матеріалу - нікелю та спікали в атмосфері аргону.

Для досягнення потрібних вагових співвідношень між вихідним вуглецевим матеріалом та лугами (1:1; 1:2; 1:3; 1:4) проводили ретельне перемішування сухих компонент. Щоб запобігти попаданню в суміш шкідливих домішок перемішування проводили в агатовій ступці. Однорідну суміш поміщали в нікелевий човник та проводили процес спікання по наступній процедурі.

Нікелевий човник із однорідною сумішню розміщували в ампулі із кварцового скла, яка мала два отвори: до вхідного було підключено потік аргону, а вихідний був обладнаний системою газо - та водовідведення. Ампулу з човником розміщували в термічній печі, яку було обладнано термопарою для контролю за температурою. Температуру підвищували зі швидкістю  $10^\circ \text{C}/\text{хв}$ . В температурному інтервалі

від 300 до 400<sup>0</sup> С спостерігалось інтенсивне виділення води. Тому систему витримували при цій температурі протягом 30 хвилин. Спінання проводили при температурі 760 ± 5<sup>0</sup> С протягом години. Реакційну суміш охолоджували в термічній печі до 30<sup>0</sup> С, а потім вимивали із човника ізопропіловим спиртом. Суміш відстоювали до повного завершення виділення з пор газоподібних продуктів. Після декантації спирту активований вуглецевий матеріал вимивали і переносили водою в центрифужні пробірки. Суміш сім разів центрифугували, кожен раз з новою порцією дистильованої води. Для відмивання водою використовували лабораторно-медичну центрифугу MPW-340.

Остаточню активований матеріал відмивали від луку кип'ятінням в розбавленому розчині азотної кислоти протягом 2 годин. Після обробки азотною кислотою пористий вуглецевий матеріал кип'ятили у воді протягом однієї години. Потім суміш знову центрифугували для остаточного відмивання. Повноту відмивання контролювали за допомогою індикаторного паперу.

Отриманий пористий вуглецевий порошок фільтрували через щільний фільтрувальний папір. Потім, отриманий таким чином пористий вуглецевий матеріал, сушили спочатку при температурі 20<sup>0</sup> С протягом 2-х годин, а потім досушували в сушильній шафі при температурі 250<sup>0</sup> С до постійної ваги.

Для отриманого після активації вуглецевого матеріалу визначалась його пориста структура.

Потім на базі активованого пористого вуглецевого матеріалу виготовлялись композитні електроди для електрохімічної комірки. До складу композитних електродів входили: пористий вуглецевий матеріал (93 вагових відсотка), зв'язуюче PVDF (3 вагових відсотка), високопровідний вуглецевий матеріал «Super P» (4 вагових відсотка). Останній використовується для зменшення електричного опору електродів.

Для визначення ємності композитних електродів застосовувався метод гальваностатичного циклування. Суть методу полягає в тому, що заряд і розряд електрохімічної комірки проводять постійним струмом при цьому реєструється залежність різниці потенціалів на зовнішніх електродах комірки від часу. Вивчались як анодні так і катодні ємнісні характеристики композитного пористого матеріалу. З отриманих значень для ємності композитних електродів розраховувались питомі анодна та катодна ємності.

При постановці експерименту по вивченню електрохімічних характеристик активованого вуглецевого матеріалу одночасно реєструвались зміни потенціалів з часом для позитивного та негативного електродів електрохімічної комірки. Для цього була виготовлена трьох електродна електрохімічна комірка аналогічна тій, що була запропонована в роботі [12]. Схематичне зображення комірки наведено на рис. 2.

Електрод, виготовлений з досліджуваного матеріалу, був робочим. Товщина робочого електроду складала 60 мкм ± 2 мкм. Проти-електрод виготовляли з високопористої вуглецевої тканини марки «Дніпро» виробництва броварського заводу порош-

кової металургії. Товщина проти-електроду становила 500 мкм ± 5 мкм. Головною вимогою при виборі проти-електроду є дотримання умови, коли площа його поверхні не менше ніж на порядок перевищує площу поверхні робочого електроду.

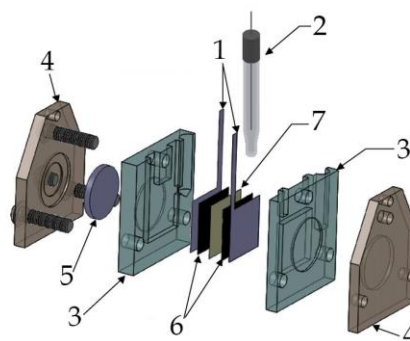


Рисунок 2 – Схематичне зображення комірки для дослідження електрохімічних характеристик активованого вуглецевого матеріалу: 1 – колектор струму; 2 – електрод порівняння; 3 – ізолююча прокладка; 4 – корпус комірки; 5 – поршень для електродів ; 6 – електроди; 7 – сепаратор

В якості електроду порівняння використовували пару Li<sup>+</sup>/Li, електрод був виготовлений з літєвої дротини, зануреної в розчин тетрафтороборату літію в  $\gamma$ -бутиролактоні. Електрод порівняння з'єднували з електрохімічною коміркою через два електролітичні містки, що містили розчин електроліту, аналогічний за складом електроліту в комірці. Цей електрод порівняння попередньо був відкалібрований відносно внутрішнього стандарту – редокс-пари Fc<sup>+</sup>/Fc. Потенціал цієї пари не залежить від використовуваного розчинника, тому її використовують при роботі з неводними електролітами. Наявність електроду порівняння дозволяє реєструвати в режимі єдиного часу зміну потенціалу на кожному електроді – позитивному і негативному. Ця обставина при циклюванні комірки в гальваностатичному режимі дозволяє безпосередньо визначати всі параметри, віднесені до кожного з електродів. В якості електроліту використовували 1,3 М розчин тетрафтороборату тетраетиламонію в ацетонітрилі. Всі вимірювання проводились при температурі +25<sup>0</sup>С. Електрохімічні дослідження проводились за допомогою лабораторного вимірювального комплексу «Vipotentiostat – 720E» виробництва Китай.

Результати електрохімічних вимірів наведені в табл. 1.

При розрахунках питомої ємності розглядалась ємність та вага позитивного та негативного композитного електроду окремо. Всі результати наведені в таблиці в сьомій колонці нормувались на вагу активованого вуглецевого матеріалу.

Нагадаємо, що процес активації відбувається за рахунок згоряння вуглецю як в порах так і по всій поверхні частинок порошку вихідного вуглецевого матеріалу. У другій колонці в табл. 1 вказано який відсоток вихідного матеріалу згоряв в процесі активації. Чим вище концентрація лугів тим більше згоряло вуглецевого матеріалу.

Таблиця 1 – Катодні та анодні ємнісні характеристики електродів після активації вихідної сировини лугами

№ п/п	Співвідношення між вуглецевим матеріалом та лугами	Відсоток згорання вуглецевого матеріалу	Питома площа поверхні (м <sup>2</sup> /г)	Питома площа поверхні (м <sup>2</sup> /г) пор розмір яких більше 1 нм.	Результати електрохімічних вимірів	
					Знак електроду	Питома ємність Ф/г
1	1:0,25	7	1400	500	-	34
					+	58
2	1:0,5	12	1578	600	-	69
					+	80
3	1:1	22	1714	800	-	75
					+	92
4	1:2	31	1810	960	-	86
					+	97
5	1:3	40	2580	1680	-	105
					+	110
6	1:4	47	2140	1500	-	90
					+	95

При збільшенні концентрації лугів від співвідношення 1:0,25 до 1:3 відбувається зростання як загальної питомої площі поверхні так і площі поверхні пор розмір яких більше 1 нм. Таке зростання відбувається за рахунок того, що пори за розміром менше 1 нм збільшують свій діаметр та, як наслідок, збільшують як загальну питому площу поверхні так і площу поверхні пор розмір яких більше 1 нм. Подальше збільшення концентрації лугів в процесі додаткової активації вуглецевого порошку (співвідношення 1:4) приводить до того, що частина пор повністю вигоряє, що призводить до зменшення як загальної питомої площі поверхні так і площі поверхні пор розмір яких перевищує 1 нм.

На рис. 3 наведено розподіл пор за розмірами після процесу активації для співвідношення між вуглецевим порошком та лугами 1:3.

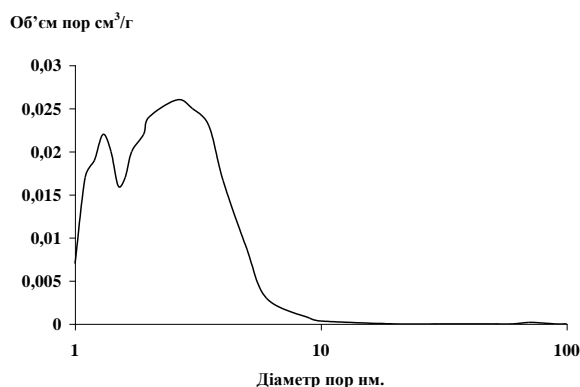


Рисунок 3 – Розподіл пор за розмірами для вуглецевого порошку, отриманого активацією з вуглецевого матеріалу “Filtrosorb Chemviron Carbon” марки F300 при співвідношенні вихідного вуглецевого матеріалу з лугами 1:3

При проведенні аналізу результатів наведених в табл. 1, особливу увагу слід звернути на шосту та сьому колонки, в яких наведені результати електрохімічних вимірів. Аналізуючи наведені в цих колонках результати, можна зробити висновки, що найбільш перспективним можна вважати вуглецевий матеріал отриманий при спіканні вуглецевого матеріалу з лугами при співвідношенні 1:3. Це пов'язано не тільки зі збільшенням питомої ємності позитивних та негативних електродів але й з вирівнюванням питомих ємностей для позитивного та негативного електродів.

Для пояснення отриманих результатів необхідно порівняти загальну поруватість (наведена в табл. 1) та розподіл пор за розмірами вихідного матеріалу (рис. 1) та вуглецевого порошку після додаткової активації його лугами при співвідношенні 1:3 (рис. 3). Як видно з цих рисунків суттєво змінюється розподіл пор за розмірами. Зростає кількість пор діаметр яких перевищує 1 нм.

Зміна співвідношення між розмірами пор в електродах веде до вирівнювання між питомими ємностями позитивного та негативного електродів.

Така розбіжність між ємностями позитивного та негативного електродів існувала для вихідного матеріалу. Існування такої розбіжності можна пояснити різницею в розмірах катіонів (Et<sub>4</sub>N<sup>+</sup> - 6,9 Å), та аніонів (BF<sub>4</sub><sup>-</sup> - 4,6 Å) електроліту, який використовується в СК. Тобто частина пор вихідного матеріалу, які були доступні для аніонів були недоступні для катіонів. Такими порами можна вважати пори діаметр яких менше ніж 2 нм.

Зі збільшенням в процесі травлення кількості пор більшого розміру збільшується кількість пор які стають однаково доступні як для катіонів так і для аніонів органічного електроліту. Це призводить до того, що відбувається зменшення різниці в питомій ємності між позитивним та негативним електродами. Це в свою чергу веде до зростання загаль-

ної ємності СК, електроди якого виготовлені з вуглецевого порошку, що пройшов додаткову активацію лугами.

Аналізуючи дані, наведені в табл. 1, можна зробити висновки про взаємозв'язок між питомою площею поверхні та ємністю електрохімічної системи. З наведених результатів випливає, що ємності позитивних та негативних електродів зростають не пропорційно зростанню площі поверхні пор діаметр яких перевищує 1 нм. Ємність зростає пропорційно зростанню повної площі поверхні електродів. З цього випливає, що суттєвий внесок в електрохімічну ємність вносить площа поверхні частинок порошку вуглецевого матеріалу.

#### ВИСНОВКИ.

1. Експериментально встановлено, що максимальна питома площа поверхні пор, яку можна отримати шляхом додаткової активації пористого вуглецевого матеріалу лугами не перевищує 2600 м<sup>2</sup>/г.

2. Показано, що питома ємність електрохімічної системи пористий вуглецевий електрод/органічний електроліт нелінійно залежить від розміру пор і набуває максимального значення коли пори стають однаково доступні для катіонів та аніонів електроліту.

3. Проведені дослідження показали, що для найбільш вживаного на практиці електроліту, який являє собою розчин тетрафтороборату тетраетиламонію в ацетонітрилі оптимальний розмір пор вуглецевого матеріалу лежить в межах від 2 до 6 нм.

4. Доведено, що ємність електрохімічної системи пористий вуглецевий електрод/органічний електроліт визначається не тільки порами в яких адсорбуються іони електроліту але й загальною площею поверхні частинок вуглецевого матеріалу.

Робота виконана за підтримки проекту № WQ20142200205 Бюро у справах іноземних спеціалістів КНР.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Burke A. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology, *Journal of Power Sources*, 2000, Vol. 91, no. 1, pp. 37–50.

2. Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 2006, Vol. 157, no. 1, pp. 11–27.

3. Frackowiak E., Beguin F. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors, *Carbon*, 2011, Vol. 39, no. 6, pp. 37–50.

4. Conway B. E. *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, – Kluwer Academic Publishers, 1999 – 698 p.

5. Lockett V., Sedev R., Ralston J. Differential capacitance of the Electrical Double Layer in imidazolium-based ionic liquids: influence of potential, cation size and temperature, *Journal of Physical Chemistry A*, 2008, Vol. 82, pp. 105–115.

6. Jongil L., John D. W., James G. B., Julian V. Effect of electrode pore geometry modeled using Nernst–Planck–Poisson-modified Stern layer model, *Comput Mech.*, 2009, Vol. 43, pp. 461 – 475.

7. Mysyk R., Raymundo-Picero E., Beguin F. Saturation of subnanometer pores in an electric double-layer capacitor, *Electrochemistry Communications*, 2009, Vol. 11, pp. 554–556.

8. Pehr B. Charge/discharge of an electrochemical supercapacitor electrode; non-uniqueness of mathematical models, *Electrochemistry Communications*, 2007, Vol. 9, pp. 211–215.

9. Hirotoishi Ya., Isamu M., Tetsuichi K. Electric double layer capacitance on hierarchical porous carbons in an organic electrolyte, *Journal of Power Sources*, 2008, Vol. 175, pp. 651 – 656.

10. Gamby J., Taberna P. L., Simon P., Fauvarque J. F., Chesneau M. Studies characterizations of various activated carbons used for carbon/carbon supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 2009, V. 101, pp. 109–116.

11. Изотов В. Ю. Оптимізація структури активованих вуглецевих матеріалів для суперконденсаторів // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, 2009. – Вип. 65 (3). – С. 107–112.

12. Keh-Chyun T., Lei Z., JiuJun Z. Effects of electrode layer composition/thickness and electrolyte concentration on both specific capacitance and energy density of supercapacitor, *Electrochimica Acta*, 2012, Vol. 60, pp. 428 – 436.

#### TECHNOLOGY FOR OBTAINING CARBON MATERIAL

#### WITH OPTIMAL PORE SIZE DISTRIBUTION FOR SUPERCAPACITOR ELECTRODES

V. Izotov<sup>1,2</sup>, D. Havrikov<sup>1,2</sup>, I. Koltsov, A. Selikhova, N. Klyui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics, Jilin University

vul. Qianjin, 2699, Changchun, 130012, People's Republic of China. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

O. Belyaev, I. Burlaka, D. Yarmolenko

<sup>2</sup> V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine

prosp. Nauky, 41, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: belyaev@isp.kiev.ua

**Purpose.** To find the optimal ratio between the pore sizes of the activated carbon material from which the electrodes are made and the size of the ions of the organic electrolyte, which allows obtaining the maximum capacity for symmetric SC. **Methodology.** The work has been carried out by searching for the optimal ratio between the pore size and the electrolyte ions size. In the process of chemical activation occurred carbon combustion within the pores, which increased specific surface area of the carbon material and as a result, lead to increase of the specific energy capacity of electrodes for SC. **Results.** The example of an electrochemical system of a porous carbon electrode / organic electrolyte shows that the maximum capacity is reached when the pores of the carbon material become equally accessible both for

cations and for anions. It is shown that not only the pore area but also the surface of the carbon powder, from which the electrodes are made, has a significant effect on the capacitance of the SC. **Originality.** The approach allows to obtain porous carbon materials with a specified pore size distribution. **Practical value.** This technology allows to obtain porous carbon materials, that are promising for the production of SC with high specific power. References 12, figures 3.

**Key words:** supercapacitor, porous carbon material, the specific energy.

## REFERENCES.

1. Burke, A. (2000), "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", *Journal of Power Sources*, Vol. 91, no. 1, pp. 37–50.
2. Pandolfo, A.G., and Hollenkamp, A.F. (2006), "Carbon properties and their role in supercapacitors", *Journal of Power Sources*, Vol. 157, no. 1, pp. 11–27.
3. Frackowiak, E., and Beguin, F. (2001), "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors", *Carbon*, Vol. 39, no. 6, pp. 37–50.
4. Conway, B. E. (1999), *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, – Kluwer Academic Publishers, – 698 p.
5. Lockett, V., Sedev, R., and Ralston, J. (2008), "Differential capacitance of the Electrical Double Layer in imidazolium-based ionic liquids: influence of potential, cation size and temperature", *Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 82, pp. 105–115.
6. Jongil, L., John, D. W., James, G. B., and Julian, V. (2009), "Effect of electrode pore geometry modeled using Nernst–Planck–Poisson-modified Stern layer model", *Comput Mech.*, Vol. 43, pp. 461 – 475.
7. Mysyk, R., Raymundo-Picero, E., and Beguin, F. (2009), "Saturation of subnanometer pores in an electric double-layer capacitor" *Electrochemistry Communications*, Vol. 11, pp. 554–556.
8. Pehr, B. (2007), "Charge/discharge of an electrochemical supercapacitor electrode pore; non-uniqueness of mathematical models", *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 211–215.
9. Hirotohi, Ya., Isamu, M., and Tetsuichi, K. (2008), "Electric double layer capacitance on hierarchical porous carbons in an organic electrolyte", *Journal of Power Sources*, Vol. 175, pp. 651 – 656.
10. Gamby, J., Taberna, P. L., Simon, P., Fauvarque, J. F., and Chesneau, M. (2001), "Studies characterizations of various activated carbons used for carbon/carbon supercapacitors", *Journal of Power Sources*, V. 101, pp. 109–116.
11. Izotov, V. Yu. (2009), "Optimization of activated carbon materials for supercapacitors", *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, vol. 65, no. 3, pp. 107 - 112.
12. Keh-Chyun, T., Lei, Z., and JiuJun, Z. (2012), "Effects of electrode layer composition/thickness and electrolyte concentration on both specific capacitance and energy density of supercapacitor", *Electrochimica Acta*, Vol. 60, pp. 428 – 436.

Стаття надійшла 16.03.2017.