На правах рукописи

Янилкин Игорь Витальевич

Угольные электроды из древесины для двойнослойных суперконденсаторов с органическим электролитом

Специальность — 05.17.03 Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель:

Школьников Евгений доктор технических наук

Иосифович

Официальные оппоненты: Кулешов Николай Васильевич,

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой химии и электрохимической энергетики

# Рычагов Алексей Юрьевич,

кандидат химических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской Наук, старший Академии научный лаборатории процессов в химических источниках тока

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита состоится «20» июня 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.10 на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д.68, Зал заседаний Ученого совета, каб. 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте www.kstu.ru.

Автореферат разослан « » 20 г.

диссертационного совета Д.212.080.10

Межевич Жанна Витальевна

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Двойнослойные (ДСК) суперконденсаторы занимают промежуточное Энергия положение между аккумуляторами И конденсаторами. таком суперконденсаторе запасается в двойном электрическом слое на границе твердый проводник-электролит. Благодаря TOMY, что расстояние между обкладками конденсатора в двойном слое может быть порядка нескольких ангстрем, а в качестве электродов можно использовать микропористые материалы с огромной удельной поверхностью, удельная емкость таких суперконденсаторов на много порядков выше, чем у обычных конденсаторов.

Ввиду достаточно серьезного спроса на суперконденсаторы, ведется большое количество научных исследований по улучшению их характеристик. В основном они двух направлениях: поиск новых электролитов, повышающих проводятся в максимальное напряжение ДСК; поиск новых материалов электродов, обеспечивающих высокие емкость и мощность ДСК. Часто работа по поиску электролита инициирует подбор материала электрода. На сегодняшний день исследовано большое число различных электролитов (водных, органических и ионных жидкостей) и различных электродных материалов. Наиболее востребованный материал для электродов – активированный уголь. Поскольку его получают практически из любого органического сырья и с учетом различных вариаций карбонизации и активации этого сырья, то количество вариантов полученных макрои микроструктур угля велико. Некоторые образцы угля обладают большой емкостью двойного слоя в определенном электролите. Однако на рынке для электродов ДСК на сегодняшний день используются угли с существенно меньшей емкостью двойного слоя – марок Kuraray (Япония), Norit (Нидерланды), Energ2 (США). Это происходит потому, что кроме удельной емкости двойного слоя угля важны и другие параметры: ресурсная стабильность электролита в данном угле, его стоимость, минимизация объема мезо- и макропор, низкий саморазряд, которые часто не учитываются другими исследователями. В открытом доступе практически нет работ по оптимизации угля по всем перечисленным параметрам.

Поэтому разработка научных основ технологии получения активированного угля из малоценной лиственной древесины относительно дешевого, но высокотехнологичного продукта материала электрода суперконденсатора,

отвечающего следующим требованиям: высокая объемная емкость двойного слоя, высокая ресурсная стабильность ДСК, низкий саморазряд, низкая себестоимость угля, является актуальной задачей.

Степень разработанности Активированным темы. углям ДЛЯ суперконденсаторов посвящено большое число работ. Исследуются угли из растительного сырья, полимеров, торфа, компонентов нефти и т.д. Однако именно уголь из древесины в литературе представлен незначительно. Есть некоторое количество работ, где исследовались активированные угли из древесины для применения В суперконденсаторах. Использование угля ИЗ ольхи ДЛЯ суперконденсатора с органическим электролитом до сегодняшнего не представлено в научной литературе.

# Цель работы

Развитие научных основ технологии получения высокоэффективных угольных электродов из древесины для двойнослойных суперкондентсаторов с органическим электролитом.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1. Разработка способа создания электродов суперконденсаторов с органическим электролитом из полученных активированных углей.
- 2. Разработка измерительной ячейки ДСК, включающая основные материалы и моделирующая технологии сборки промышленных образцов СК.
- 3. Исследование зависимости электрической емкости ДСК с органическим электролитом от пористой структуры синтезированных активированных углей.
- 4. Подбор оптимальных параметров активации углей из ольхи и березы для достижения максимальной объемной емкости ДСК (Ф/см<sup>3</sup>).
- 5. Создание способов улучшения ресурсной стабильности и уменьшения саморазряда предлагаемого ДСК с органическим электролитом.

# Научная новизна работы

1. Впервые разработаны электроды из активированного угля на основе березы и ольхи для ДСК с органическим электролитом: 1,0 М тетраэтиламмоний тетрафторборат в ацетонитриле. Данные электроды превосходят по емкостным параметрам существующие коммерческие мировые аналоги, не уступая им в ресурсной стабильности.

- 2. Определена оптимальная пористая структура активированных углей из ольхи и березы для электродов ДСК с органическим электролитом: 1,0 М тетраэтиламмоний тетрафторборат в ацетонитриле. Показано, что объем пор, шириной менее 4 нм, на уровне 0.8 см<sup>3</sup>/г обеспечивает максимальную удельную (Ф/см<sup>3</sup>) емкость ДСК (более 24 Ф/см<sup>3</sup>) с данным электролитом.
- 3. Показана возможность увеличения (примерно на порядок) ресурсной стабильности суперконденсатора посредством термообработки и/или подбором параметров активации угля из ольхи и березы.
- 4. Для активированных углей на основе малоценной лиственной древесины достигнуты одновременно характеристики (на органическом электролите 1,0 М тетраэтиламмония тетрафторборат в ацетонитриле) 158 Ф/г (емкость двойного слоя угля), 20.9 Ф/см<sup>3</sup> (емкость ДСК на объем электродов), падение емкости 14 % при 83000 циклов (1.35-2.7 В, 25 мА/см<sup>2</sup>, 25 °C), саморазряд: падение с 2.5 до 1 В за 70 суток.

## Практическая и научная значимость работы

- 1. Предложены технологические приемы изготовления электродов для ДСК с водным и органическим электролитом путем каландрирования. Предложены оптимальные варианты для создания электродов с высокой удельной емкостью.
- 2. Найденная обратная зависимость емкости двойного слоя углей от площади их поверхности показывает, что высокая объемная емкость ДСК достигается не путем увеличения поверхности угля, а за счет прочих факторов: емкость, связанная с химическими процессами на поверхности угля, оптимальная толщина стенок пор угля, эффект размера пор, соотношение базальных и торцевых плоскостей угля.
- 3. Предложены методики и рекомендации по повышению ресурсной стабильности и уменьшению скорости саморазряда ДСК. Разработанные методики могут применяться и для других активированных углей (например, предлагаемых к использованию компаниями-лидерами) в суперконденсаторах с данным электролитом.
- 4. Предложена методика выбора оптимальных параметров активации угля. Данная методика может использоваться для получения оптимальной пористой структуры из другого сырья и/или для другого электролита.

**Методология и методы исследований** базируются на современных электрохимических и физических методах и методиках, позволяющих исследовать морфологию, распределение пор частиц активированного угля, емкостные свойства угля, количество функциональных групп на поверхности угля, электрические характеристики и ресурсную стабильность суперконденсаторов.

## Положения, выносимые на защиту

- 1. Закономерности изменения объема пор и площади поверхности активированных углей на основе березы и ольхи от параметров их синтеза.
- 2. Зависимость удельной емкости двойного слоя активированных углей на основе березы и ольхи от удельной поверхности.
- 3. Экспериментально обоснованная оптимальная пористая структура активированных углей на основе березы и ольхи для ДСК с органическим электролитом: 1,0 М тетраэтиламмоний тетрафторборат в ацетонитриле.
- 4. Зависимости характеристик модельных ДСК от условий изготовления электродов (методики, количество связующего).
- 5. Результаты ресурсных испытаний и испытаний на скорость саморазряда модельных ДСК с электродами из активированного угля на основе березы и ольхи.
- 6. Сравнительные характеристики активированного угля, полученного по предлагаемому способу, с таковыми для мировых аналогов: удельная емкость двойного слоя, электропроводность и ресурсная стабильность.

#### Личный вклад автора

Все положения, выносимые на защиту, получены лично автором или при его определяющем участии. Автор принимал активное участие в формулировке требований к пористой структуре активированных углей в процессе их получения, разработке методик и проведении научных экспериментов по исследованию электрохимических характеристик суперконденсаторов. Автором были предложены и способы для увеличения ресурсной стабильности и реализованы снижения двойнослойных суперконденсаторов. саморазряда Автор принимал непосредственное участие в разработке методик изготовления электродов. По результатам исследования автором сформулированы и обоснованы выводы и заключения, вошедшие в диссертацию.

Достоверность И обоснованность научных положений определяется использованием достоверных данных и современных мировых достижений в рассматриваемой области, a проведением также модельных натурных экспериментов применением современных физико-химических c методов исследования.

# Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на российских и международных конференциях: 10, 11 Российские симпозиумы «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновескных средах» (Новый Афон, Абхазия, 2012, 2013), XXVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, 2013), IV Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные вопросы углехимии и химического материаловедения» (Кемерово, 2015).

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 5 статей в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 4 тезисов в сборниках трудов конференций и 1 патент (Всемирная организация интеллектуальной собственности WO).

# Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 135 наименований. Работа изложена на 130 страницах, содержит 65 рисунков и 10 таблиц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость.

**Литературный обзор** начинается со сравнения трех основных устройств аккумуляции электрической энергии: конденсаторов, электрических аккумуляторов и батарей, электрохимических конденсаторов. Далее показан принцип работы суперконденсатора, приведены основные параметры ДСК, его эквивалентная схема, основные методики исследования суперконденсаторов и их особенности.

Проведено также сравнение основных угольных материалов для электродов ДСК. Подробно рассмотрен процесс активации угля: влияние сырья и различных

параметров активации на пористую структуру угля и количество поверхностных функциональных групп. Освещены основные методики изготовления электродов ДСК из активированного угля. Приведены примеры наиболее распространенных электролитов для ДСК, их важнейшие свойства.

Завершается обзор рассмотрением особенностей деградации емкости и увеличения внутреннего сопротивления ДСК с органическим электролитом при его длительной работе.

В части, посвященной объектам, методам приготовления И их экспериментального исследования, описаны методики изготовления активированного угля, электродов из него, сборки и испытания различных видов ячеек ДСК. Приведен регламент процесса щелочной (NaOH) активации угля из карбонизированного прекурсора (березовый и ольховый уголь). Обозначение образцов в диссертационной работе выглядит следующим образом: первая часть буквы О или Б обозначали исходное сырье (ольха и береза соответственно), затем приводится массовое отношение активатор/сырье (К), далее - температура активации, в конце – температура термообработки (в скобках указано время термообработки в часах). Далее описан регламент термообработки угля в инертной среде, методики изготовления электродов (каландрирование) и испытания электродов на прочность, методики порометрии углей и термогравиметрического анализа.

Описан процесс изготовления электродов и сборки ячеек ДСК с двумя раствором электролитами: 3,4 M серной И 1,0 кислоты M раствором тетраэтиламмония тетрафторбората (Et<sub>4</sub>NBF<sub>4</sub>) в ацетонитриле. Представлены ячейки двух видов: ячейка для измерения емкости двойного слоя электродов (рис. 1А), внутреннего сопротивления и ламинатная ячейка для длительных ресурсных испытаний ДСК (рис. 1Б). Далее приведены методики испытания ячеек при определении емкости двойного слоя, внутреннего сопротивления ДСК, а также методики длительных ресурсных испытаний (циклирование и потенциостатический режим при повышенных напряжениях и высоких температурах).

Экспериментальная часть посвящена экспериментальным результатам и их обсуждению. Приведено сравнение характеристик ДСК, изготовленных из ОЗ.7-700 двумя способами: напылением и каландрированием. Показано, что каландрирование позволяет создавать более плотные электроды, что благоприятно сказывается на удельных характеристиках ДСК.

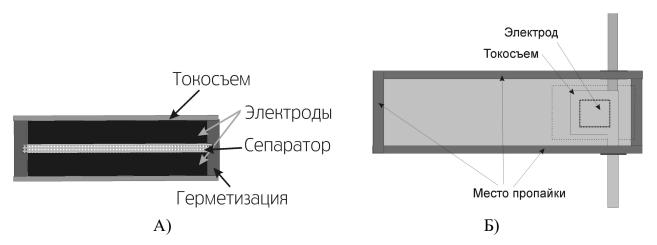


Рисунок 1. Схема измерительной ячейки для: A – определения емкости двойного слоя электродов, Б –длительных ресурсных испытаний ДСК.

Для осуществления способа каландрирования разработано две методики изготовления электрода: изготовление отдельных небольших полосок электродов из пластилиноподобной массы (методика 1 - лабораторный вариант) и изготовление непрерывной ленты из порошковой массы (методика 2 - промышленный вариант создания катушек электродов). Показано, что в случае использования второй методики глобулы связующего фторопласта при каландрировании разматываются гораздо эффективнее (рис. 2). Это негативно сказывается на пропитке таких электродов водным электролитом и, следовательно, на емкости ДСК. Однако разработанный нами метод пропитки под давлением позволяет нивелировать этот эффект. Для органического электролита обе методики дают одинаковые результаты при оценке емкости двойного слоя электродов (рис. 3).

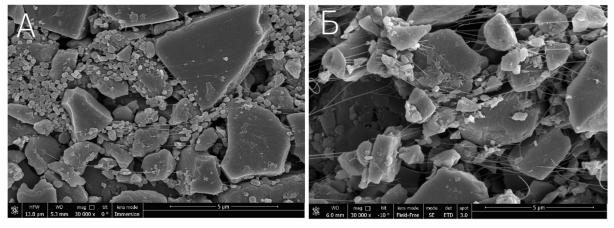


Рисунок 2. Электронные микрофотографии среза электродов, полученных по разным методикам: А - методика 1, Б - методика 2. Содержание фторопласта 10 %. масс.

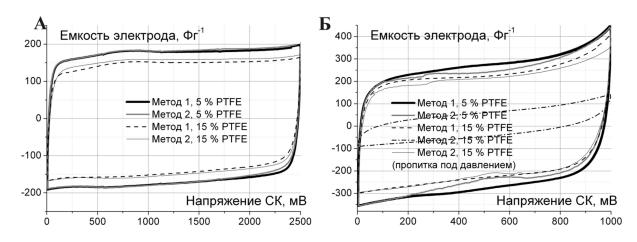


Рисунок 3. Циклические вольтамперограммы ДСК с органическим (A) и водным (Б) электролитом в случае электродов, изготовленных по двум методикам и с различным содержанием связующего в них. Скорость развертки 20 мВ/сек.

исследование пористой структуры Проведено березового ольхового активированных углей различными методами (лимитированного испарения и низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ и V-t)) при различных параметрах активации (рис. 4А). Наиболее адекватные результаты демонстрирует расчет площади поверхности по методу лимитированного испарения. Используя данные расчетов, построены зависимости удельной емкости двойного слоя электродов от их удельной поверхности, ДЛЯ водного. так И ДЛЯ органического электролита. Экспериментально установлена обратная зависимость емкости удельной поверхности в диапазоне  $700-2000 \text{ м}^2/\Gamma$ .

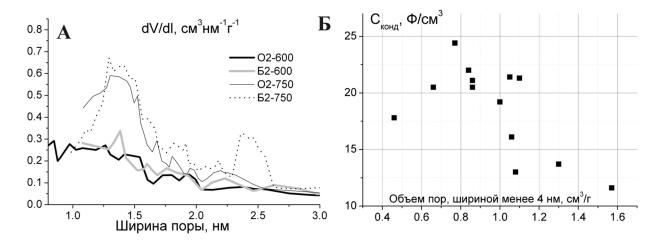


Рисунок 4. А - распределение пор березового и ольхового углей, полученное методом лимитированного испарения. Б - зависимость объемной емкости электродов от объема пор угля, шириной менее 4 нм для органического электролита.

В данной обратной зависимости емкости двойного слоя от площади поверхности могут участвовать одновременно, хотя и в разной степени, четыре фактора: псевдоемкость угля (емкость, связанная с электрохимическими процессами на поверхности), утоньшение стенок пор (затруднение переноса заряда по твердой фазе), эффект размера пор, соотношение площадей базальных и торцевых плоскостей угля. Все четыре фактора подробно обсуждены в работе.

Представлены результаты оптимизации пористой структуры электродов для ДСК с органическим электролитом, проводимой с целью получения максимальной удельной энергоемкости. Для достижения последней при активации последовательно варьировали два основных параметра: массовое отношение щелочь/уголь и температуру активации. Критерием оптимизации являлся параметр объемной емкости электродов ( $\Phi$ /см<sup>3</sup>). В результате экспериментов установлено, что оптимальным значением температуры активации является величина 600 °C. Оптимальное соотношение щелочь/уголь для используемого органического электролита составляет K=2. При данных параметрах объемная емкость электродов для органического электролита составила 24.5  $\Phi$ /см<sup>3</sup>, объем микропор ~ 0.8 см<sup>3</sup>/г (рис. 4Б).

Проведено исследование, посвященное работе по повышению ресурсной стабильности электродов в органическом электролите. В качестве стандарта углей с высокой ресурсной стабильностью использовались угли Kuraray YP-50F (Япония) и EnerG2 P2 (США). Увеличение температуры обработки угля приводит к уменьшению количества поверхностных функциональных групп (ПФГ), что и демонстрируют результаты термогравиметрического анализа (рис. 5А). Рост температуры и времени термообработки в целом увеличивают ресурсную стабильность электродов. При этом 800 °C позволила термообработка при добиться ресурсной стабильности предлагаемого угля на уровне углей Kuraray YP-50F и EnerG2 P2 (рис. 5Б). Полученные результаты указывают на корреляцию между количеством поверхностных функциональных групп и его ресурсной стабильностью.

В ходе циклических ресурсных испытаниях (плотность тока 25 мА/см<sup>2</sup>, диапазон напряжений 1.35-2.7 В при комнатной температуре) было также показано, что термообработки угля Б2-600 или О2-600 при 800 °С в течение одного часа достаточно для того, чтобы достигнуть ресурсной стабильности, сравнимой с выбранными аналогами (Kuraray YP-50F, EnerG2 P2). Установлено, что активация при более высоких температурах позволяет производить уголь с меньшим

количеством ПФГ (рис. 5A). Поэтому ресурсная стабильность таких образцов угля выше, и они не требуют высокой температуры термообработки.

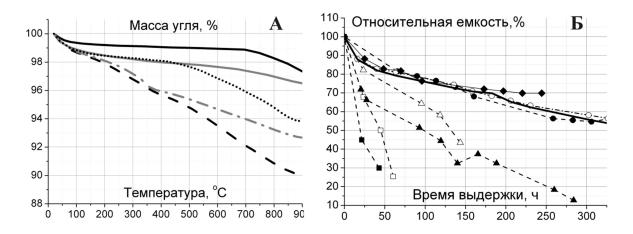


Рисунок 5. А - результаты термогравиметрического анализа (в аргоне) образцов углей: Б2-600 (штрих-пунктир), Б2-600-800(1) (серая линия), Кигагау YP-50F (черная линия), Б2-700 (серые точки-тире), Б2-700-400(2) (черные точки). Б - зависимость значения относительной емкости двойного слоя электродов от времени выдержки ячейки СК при 3.1 В и температуре 60 °С для различных температуры и времени термообработки угля. Сравнение с референсными марками угля. ■ – О2-600, □ - О2-600-400(1), ▲ - О2-600-400(4), Δ - О2-600-600(4), • - О2-600-800(1), ○ - О2-600-800(2), □ - Кигагау YP-50F, черная линия - EnerG2 P2

Исследовано также влияние термообработки на характеристики электродов – удельную емкость двойного слоя и пористость. Проведены длительные циклические ресурсные испытания ДСК. Скорость падения емкости в ходе последних - 40000 циклов - практически постоянна и составляла  $\simeq 1\%$  падения емкости/18750 циклов (рис. 6).

Приведено описание разработанной методики понижения саморазряда ДСК с органическим электролитом. Выдержкой суперконденсатора под напряжением при повышенной температуре скорость саморазряда удалось существенно снизить. Достигнут саморазряд: 50 суток при падении напряжения от 2.5 В до 1.25 В на ДСК.

Показано сравнение основных характеристик разработанного угля (термообработанного) с мировыми коммерческими аналогами (табл. 1). Из сравнения следует, что предложенные в данной работе методы приготовления и обработки активированных углей позволили получить образцы угля, ничем не уступающие

мировым коммерческим аналогам, а в удельных емкостных показателях даже превосходящие их.

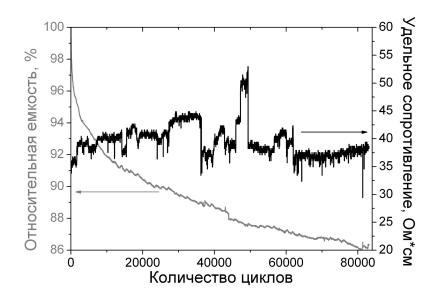


Рисунок 6. Зависимость емкости (в относит. единицах) и удельного сопротивления ДСК от количества циклов заряд-разряд. ДСК изготовлен с электродами из угля Б1.75-700-400(2).

Таблица 1. Сравнение основных характеристик суперконденсаторов с электродами из различных углей. Электролит — 1,0 М тетраэтиламмония тетрафторборат в ацетонитриле.

Марка угля	Удельная емкость угля, Ф/г	Удельная емкость электрода, Ф/см <sup>3</sup>	ESR, Om*cm	КПД, %; заряд- разряд 12 мА/см <sup>2</sup> 0-2.5 В
Energ 2 P2 (CIIIA)	111	12.5	0.40	95.6
Energ 2 V2 (CIIIA)	105	17.3	0.47	94
NORIT DLC SUPRA (Нидерланды)	86	13.4	0.36	94
Kuraray YP 50F (Япония)	107	16.2	0.48	95
Kuraray YP 80F (Япония)	103	10.6	0.59	89
ХН-002О (Китай)	128	18.3	0.45	95.4
O2-600-800(1)	158	20.9	0.49	93

Результаты работы защищены международным патентом.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

- 1. Предложен способ создания (каландрирование) электродов суперконденсаторов с органическим электролитом из полученных по предлагаемой методике активированных углей. Показано, что данный способ позволяет получать электроды для суперконденсаторов в широком диапазоне (до 20 %) доли связующего фторопласта без существенного влияния на характеристики угля.
- 2. Разработана измерительная ячейка ДСК, включающая основные материалы (ламинат и токосъем из алюминиевой фольги с углеродным адгезивом) и моделирующая технологии сборки промышленных образцов СК.
- 3. Установлена обратная зависимость удельной емкости двойного слоя от площади поверхности углей. Продемонстрировано влияние на данную зависимость четырех факторов: псевдоемкости угля (емкость, связанная с химическими процессами на поверхности угля), утоньшения стенок пор угля, эффекта размера пор, соотношения базальных и торцевых плоскостей угля.
- 4. Путем изменения параметров активации угля (температуры активации и массового отношения активатор/сырье) оптимизирована пористая структура угля из ольхи для электрода суперконденсатора с органическим электролитом. Показано, что объем пор, шириной менее 4 нм, на уровне 0.8 см<sup>3</sup>/г обеспечивает максимальную объемную емкость СК с данным электролитом. Оптимальными параметрами активации являются: температура 600 °C, соотношение активатор/сырье 2. При этом достигнуты характеристики угольных электродов: удельная (по объему) емкость ДСК до 24.5 Ф/см<sup>3</sup> и емкость двойного слоя угля до 180 Ф/г.
- 5. Предложены способы улучшения ресурсной стабильности ДСК с органическим электролитом. Показано, что высокой ресурсной стабильности и одновременно высоких объемных характеристик можно добиться двумя способами: активацией при 600 °C, K=2 (достижение высоких удельных характеристик при наличии большего количества ПФГ) и последующей термообработкой угля при 800 °C в аргоне в течение 60-70 минут (понижение удельных характеристик, удаление ПФГ из угля); активацией при 700 °C, K=1.75 (достижение более

- низких удельных характеристик при уменьшении количества  $\Pi\Phi\Gamma$ ) и, далее, термообработкой угля при 400 °C в аргоне в течение 2-4 часов.
- 6. Единовременно достигнуты электрические и эксплуатационные характеристики ДСК: емкость двойного слоя угля 158 Ф/г, удельная (по объему электродов) емкость ДСК 20.9 Ф/см³, падение емкости на 14 % при 83000 циклов (1.35-2.7 В, 25 мА/см², 25 °С), саморазряд: падение напряжения с 2.5 до 1 В в течение 70 суток.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

## Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

- Атаманюк, И.Н. Исследование перспективных электродных материалов суперкондесаторов для применения в энергетических установках на основе возобновляемых источников энергии / И.Н. Атаманюк, Д.Е. Вервикишко, А.А. Саметов и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 11 (133). С. 92-98.
- 2. Атаманюк, И.Н. Изучение влияния технологических особенностей изготовления электродов на электрохимические характеристики суперконденсаторов с водным электролитом / И.Н. Атаманюк, Д.Е. Вервикишко, А.В. Григоренко и др. // Электрохимическая энергетика. −2014. − Т. 1, № 1. − С. 3-10.
- 3. Вервикишко, Д.Е. Активированный уголь из древесины для электродов суперконденсаторов с водным электролитом / Д.Е. Вервикишко, И.В.Янилкин, Г.В. Добеле и др. // Теплофизика высоких температур. − 2015. − Т. 53, № 5. − С. 799–806.
- 4. Янилкин, И.В. Влияние количества связующего фторопласта Ф4 в угольных электродах на характеристики суперконденсаторов / И.В. Янилкин, А.А. Саметов, Е.И. Школьников // Журнал прикладной химии. 2015. Т 88, Вып. 2. С. 336-344.
- 5. Янилкин, И.В. Пористая структура и электрическая емкость углей из древесины в водном и органическом электролите / И.В. Янилкин, А.А. Саметов, И.Н. Атаманюк и др. // Журнал прикладной химии. 2015. Т 88, Вып. 7. С. 36-46.

# Публикации в сборниках трудов научных конференций

- 6. Вервикишко, Д.Е. Изучение физико-химических свойств различных активированных углей для применения их в электродах суперконденсаторов / Школьников Е.И., Янилкин И.В., Саметов А.А., Атаманюк И.Н., Григоренко А.В. // 10 Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновескных средах». 2012. С. 26.
- 7. Вервикишко, Д.Е. Оптимизация нанопористой структуры активированных углей на основе древесины для повышения удельных характеристик двойнослойных электрохимических суперконденсаторов / Янилкин И.В., Саметов А.А., Григоренко А.В., Атаманюк И.Н., Школьников Е.И. // 11 Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновескных средах». 2013. С. 23.
- 8. Vervikishko, D.E. Research and development of electrochemical double layer capacitors / Yanilkin I.V., Sametov A.A., Atamanyk I.N., Shkolnikov E.I. // XXVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. 2013. P. 53-54.
- 9. Янилкин, И.В. Активированные угли ИЗ отходов ДЛЯ древесины суперконденсаторов с водным и органическим электролитами / Вервикишко Д.Е., Школьников Е.И., Саметов А.А., Атаманюк И.Н. // IV Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные вопросы углехимии И химического материаловедения». -2015. - C.47.

#### Патенты

10. Патент всемирной организации интеллектуальной собственности WO 2014/088439 A1, 12.06.2014.