

УДК 541.136

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ САМОЗАРЯЖАЮЩИХСЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

© 2024 г. Н. В. Келлер^{a, *}, В. Н. Николкин^a, Д. С. Бутаков^a, А. А. Золотавин^a,
А. А. Аскарова^a, В. Я. Хейнштейн^a

^aАО “Институт реакторных материалов”, Заречный Свердловской обл., Россия

*e-mail: keller_nv@irmatom.ru

Поступила в редакцию 30.06.2023 г.

После доработки 11.12.2023 г.

Принята к публикации 26.12.2023 г.

В статье рассмотрена отработка технологии изготовления электродов суперконденсаторов из углеродных нанотрубок промышленного производства, обладающих величиной удельной поверхности 109.6 м²/г, с целью дальнейшего применения при изготовлении углеродных электродов самозаряжающихся суперконденсаторов. Электрохимические характеристики электродов из углеродных нанотрубок исследованы в симметричной двухэлектродной ячейке методом циклической вольтамперометрии, гальваностатического заряда-разряда и импедансной спектроскопии. Показано, что величина удельной емкости электрода в органическом электролите 1-бутил-3-метилимидазолий трифторметан-сульфонат:пропиленкарбонат (объемное соотношение 3:1) составила 9,1 Ф/г.

Ключевые слова: суперконденсатор, углеродные нанотрубки, двойной электрический слой, ионная жидкость

DOI: 10.31857/S0424857024070032, EDN: PPYRTY

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING ELECTRODES FOR SELF-CHARGING SUPERCAPACITORS FROM CARBON NANOTUBES

© 2024 г. N. V. Keller^{a, *}, V. N. Nikolkin^a, D. S. Butakov^a, A. A. Zolotavin^a, A. A. Askarova^a,
V. Y. Kheynstein^a

^aJSC “Research Institute of Nuclear Material”, Zarechny, Sverdlovsk region, Russia

*e-mail: keller_nv@irmatom.ru

Received June 30, 2023; revised December 11, 2023; accepted December 26, 2023

The article discusses the development of the technology for manufacturing supercapacitor electrodes from industrially produced carbon nanotubes with a specific surface area of 109.6 m²/g, with the aim of further application in the manufacture of carbon electrodes for self-charging supercapacitors. The electrochemical characteristics of carbon nanotube electrodes were studied in a symmetrical two-electrode cell using cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge, and impedance spectroscopy. It was shown that the specific capacitance of the electrode in the organic electrolyte 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethane sulfonate:propylene carbonate (volume ratio 3:1) was 9.1 F/g.

Keywords: supercapacitor, carbon nanotubes, electric double layer, ionic liquid

ВВЕДЕНИЕ

Суперконденсаторы (СК) – это электрохимические конденсаторы, которые идеально подходят для процессов, связанных с быстрым накоплением или высвобождением энергии [1]. Максимальная энергия, запасенная в СК, равна

$$W = \frac{1}{2}CU^2, \quad (1)$$

где C – электрическая емкость (Ф), U – рабочее напряжение (В). Из выражения (1) следует, что энергия, запасенная в СК, во многом зависит от выбора материала электродов и электролита.

СК являются перспективными накопителями энергии, так как обладают уникальными свойствами: высокой скоростью и большим количеством циклов заряда и разряда, широким диапазоном рабочих температур, электрической емкостью до тысяч фарад [2]. Однако СК имеют недостатки, главный из которых заключается в необходимости подзарядки от внешнего источника энергии. Решением этой проблемы могут являться атомные батареи суперконденсаторного типа. Известно изобретение [3], которое позволяет создать самозаряжающийся СК. Один из электродов самозаряжающегося СК представляет собой металлическую подложку, на которой выращен массив углеродных нанотрубок (УНТ), содержащих бета-излучающий радиоизотоп, при этом в качестве электролита могут использоваться растворы кислот, солей и щелочи. Преобразование энергии бета-частиц в электрическую энергию происходит в двойном электрическом слое, возникающем на границе электрода, содержащего бета-излучающий радиоизотоп, и электролита. Бета-частицы генерируют носители заряда путем ионизации электролита. Добавление радионуклида осуществляется путем пропитки раствором, содержащим радионуклид. Такие устройства могут работать как в режиме постоянной нагрузки, так и в импульсном режиме. Применение данного типа устройств потенциально возможно в таких отраслях экономики, как космическая, медицинская и микроэлектронная.

К недостаткам предложенной технологии изготовления самозаряжающегося СК можно отнести большую вероятность выщелачивания радионуклида электролитом из электрода, что влечет за собой снижение эффективности его работы, а также использование водных растворов

электролитов, температурный диапазон которых ограничен 0°C .

Для повышения эффективности работы самозаряжающегося СК следует использовать другой способ формирования углеродного электрода с радиоизотопом, исключающий возможность его выщелачивания. Следовательно, необходимо закрепить радиоизотоп в структуре углеродного материала. Так, в работе [4] радиоизотопы $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ были заключены в углеродной матрице. Углеродная матрица обладает высокой электропроводностью и пористой структурой, которая представлена в основном микро- и мезопорами со значением удельной площади поверхности микропор $350\text{--}400\text{ см}^2/\text{г}$.

Рассмотрим несколько способов формирования углеродных электродов традиционных суперконденсаторов. Авторы статьи [5] использовали в качестве электродов СК вольфрамовые и алюминиевые подложки, на которых были синтезированы многослойные УНТ длиной около 100 мкм методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. В.В. Чернявина и др. [6] смешивали 90% активированного угля с 10% поливинилиденфторидом в растворителе N -метилпирролидоне и наносили равномерным слоем на металлический токоъемник из никеля. Полученные электроды имели площадь 4 см^2 , толщина нанесенного угля составила 425 мкм , а удельная масса составила $10\text{--}11\text{ мг}/\text{см}^2$. В работе [7] электрод СК изготавливали по технологии многоступенчатого каландрирования. Электрод представлял собой наноструктурированную углеродную ленту из активированного угля толщиной 150 мкм , приклеенную на алюминиевый токоподвод с помощью электропроводящего адгезива.

Таким образом, электрод для самозаряжающегося СК можно изготовить путем добавления углеродного материала, в структуру которого закреплен бета-излучающий радионуклид, на стадии формирования электрода.

В качестве углеродного материала для изготовления углеродных электродов обычно используют активированный уголь ввиду большой площади поверхности, высокой температурной стабильности и низкой стоимости [8]. Однако для изготовления углеродных электродов применяются и другие углеродные материалы, например углеродные нанотрубки. УНТ обладают электрохимической стабильностью, химической инертностью, большой площадью поверхности

и более высокой электронной проводимостью по сравнению с активированным углем. За счет своих свойств УНТ находят широкое применение при создании суперконденсаторов [5].

В современных коммерчески доступных СК в качестве электролита используются ионные жидкости (ИЖ). Ионные жидкости — это новый класс неводных электролитов, состоящих полностью из органических катионов и неорганических анионов [9]. ИЖ обладают низкой токсичностью, негорючестью, хорошей электрохимической стабильностью при номинальном напряжении выше 3 В, возможностью работы при температурах ниже 0°C. Использование чистых ИЖ для работы при низких температурах ограничивается их высокой вязкостью и снижением ионной проводимости. Смешивание ИЖ с органическим растворителем, например пропиленкарбонатом (ПК) или ацетонитрилом, позволяет снизить вязкость и увеличить ионную проводимость [10, 11]. Существует множество вариантов конструирования ИЖ из разных катионов и ионов. Например, ИЖ на основе катиона 1-алкил-3-метилимидазолий применяются в качестве электролитов СК за счет относительно низкой вязкости (52 мПа·с при 20°C), большей проводимости (0.5–13 мСм/см) и низкой гидроскопичности. Также большое внимание привлекают ИЖ на основе аниона трифторметансульфонат [TfO]⁻ за счет своей гидролитической стабильности [12].

Цель данной работы заключалась в отработке технологии изготовления электродов СК из УНТ с ориентированием на дальнейшее применение при изготовлении электродов для самозаряжающихся СК, а также в исследовании электрохимических свойств изготовленных электродов в симметричной ячейке с ионной жидкостью в качестве электролита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы и материалы

Химические реактивы: пропиленкарбонат (IMPAG AG, Швейцария, Acros Organics, Бельгия), 1-бутил-3-метилимидазолия трифторметансульфонат (Leap Chem CO, Китай), 1-метил-2-пирролидон ЧДА (АО “ЭККОС-1”, РФ), поливинилиденфторид (ООО “ГалоПолимер Кирово-Черецк”, РФ), фторопластовая суспензия Ф-4Д (ООО “Изолилтпоставка”, РФ) квалификации “х.ч.” использованы в состоянии

поставки без дополнительной очистки и модификации. В работе использовали коммерчески поставляемые многослойные углеродные нанотрубки промышленного производства марки “ДЕАЛТОМ” (ООО “НПП “Центр нанотехнологий”, РФ). Для изготовления корпусов ячеек использовали титановую фольгу толщиной 0.2 мм марки ВТ1-00 (ООО ТПК “Вариант”, РФ). В качестве сепаратора использовали полипропиленовый предфильтр марки ПП-070 толщиной 0,17 мм (ООО НПП “Технофильтр”, РФ). В качестве изолятора использовали фторопласт-4 (АО “ГалоПолимер”, РФ).

Оборудование

Структуру углеродных нанотрубок изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа марки TESCAN MIRA3 (TESCAN, Чехия). Измерение площади поверхности проводили с помощью анализатора сорбции газов Nova 1200e (Quantachrome, США) методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Перед измерением образцы подвергались дегазации в течение часа при давлении 10⁻³ мм.рт.ст при температуре 290°C. Планетарный миксер Speed Mixer DAC 150.3-FV (German Energy by Hauschild) применяли для механического смешивания компонентов при приготовлении электродов. Вальцы ЮМО В-10 (ЮМО, Россия) использовали для многоступенчатого каландрирования. Сборку экспериментальной ячейки производили в герметичном перчаточном боксе G-BOX-SV-360 (ООО “ФУМАТЕК”, РФ) с применением ручного пресса F-Press CC20 (ООО “ФУМАТЕК”, РФ). Исследование электрохимических свойств экспериментальной ячейки проводили на электрохимической рабочей станции ZIVE MP2 (Wonatech, Ю. Корея). Удельную проводимость электролита определяли в стеклянной кондуктометрической ячейке погружного типа с плоскопараллельными платиновыми электродами при помощи иономера RHYWE 13701.93 (RHYWE, Германия).

Изготовление электродов

Углеродные нанотрубки в количестве 75 мас. % с фторопластовой суспензией 25 мас. % смешивались в планетарном миксере в течение 5–10 мин до получения гомогенизированной полимер-углеродной смеси в виде пластичной массы. Фторопластовая суспензия представляет собой совокупность мелких частиц PTFE в воде.

На следующем этапе производили многоступенчатое каландрирование полученной массы с помощью вальцов. При прокатке образовывалась полимер-углеродная лента, механическое связывание которой обеспечивалось за счет фибрилл из фторопласта. Вальцы находились на воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении. Нагрев вальцов не производился. Контроль толщины ленты производился на каждом этапе проката. В результате получали полимер-углеродную ленту требуемой толщины. Далее острогаченным цилиндрическим пробойником вырубали углеродные электроды. После изготовления электроды высушивали в вакууме при 60°C в течение 4 ч.

Изготовление экспериментальной ячейки

Экспериментальная ячейка была выполнена по двухэлектродной схеме и состояла из титанового корпуса, кольца-изолятора, электродов из УНТ и сепаратора (рис. 1). Дисковые углеродные электроды приклеивали к токоотводам из титановой фольги с помощью электропроводящего адгезива. Для приготовления электропроводящего адгезива смешивали 90% технического углерода и 10% поливинилиденфторида с добавлением растворителя N-метилпирролидона. Далее электроды и сепаратор пропитывали электролитом. В качестве электролита использовали смесь 1-бутил-3-метилимидазолия трифторметансульфоната и пропиленкарбоната в объемном соотношении 3:1. Герметизация экспериментальной ячейки проводилась в перчаточном боксе с инертной атмосферой (аргон) прессованием с давлением сжатия 50 кгс/см².

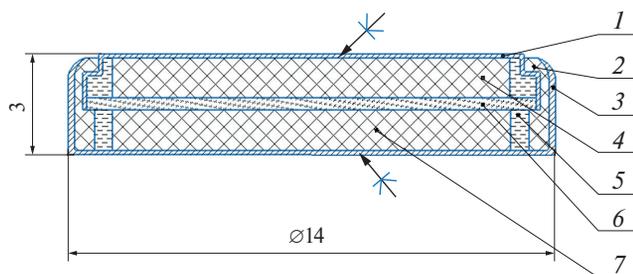


Рис. 1. Экспериментальная ячейка по двухэлектродной схеме: 1, 3 – токоотводы, 2 – изолятор, 4, 7 – углеродные электроды из УНТ, 5 – электролит, 6 – сепаратор.

Методики измерений и проведения расчетов

Расчет распределения пор по размерам в углеродном электроде проводили по методу Barret-Joyner-Halenda (ВЖН) по изотермам адсорбции и десорбции азота.

Содержание примесной воды определяли кулонометрическим титрованием по методу Карла Фишера.

Циклические вольтамперограммы снимали в режиме двухэлектродной ячейки при скоростях изменения потенциала 3, 10, 25 мВ/с в диапазоне напряжений от 0 до 2 В.

Измерение импеданса СК проводили при потенциале 0 В в интервале частот от 0.01 Гц до 1 МГц.

Измерения гальваностатическим методом в циклах “заряд-разряд” проводили в диапазоне напряжений от 0 до 1.0–2.5 В при постоянном токе от 1 до 6 мА. Расчет удельной емкости ячейки $C_{уд}$ (Ф/г) проводили по формуле:

$$C_{уд} = \frac{I\Delta t}{m_{ac}\Delta U}, \quad (2)$$

где I – ток разряда (А), Δt – время разряда (с), ΔU – изменение напряжения при разряде (В), m_{ac} – общая масса УНТ на два электрода (г).

Удельную емкость отдельного электрода из углеродных нанотрубок C_3 (Ф/г) рассчитывали по формуле:

$$C_3 = 4C_{уд}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе использовали многослойные углеродные нанотрубки с внешним диаметром от 50 нм до 70 нм и длиной до 5 мкм (рис. 2а). Удельная площадь поверхности УНТ в исходном состоянии составила 109.6 м²/г, что свидетельствует о развитой поверхности материала.

Выбор использования метода каландрирования при изготовлении электродов обусловлен тем, что этот метод позволяет минимизировать потери углеродного материала за счет использования остатков при следующем изготовлении углеродного электрода. В случае изготовления электродов для самозаряжающихся СК углеродный материал, меченный радиоизотопом, может вводиться на стадии формирования углеродного электрода. Таким образом, выбранный метод

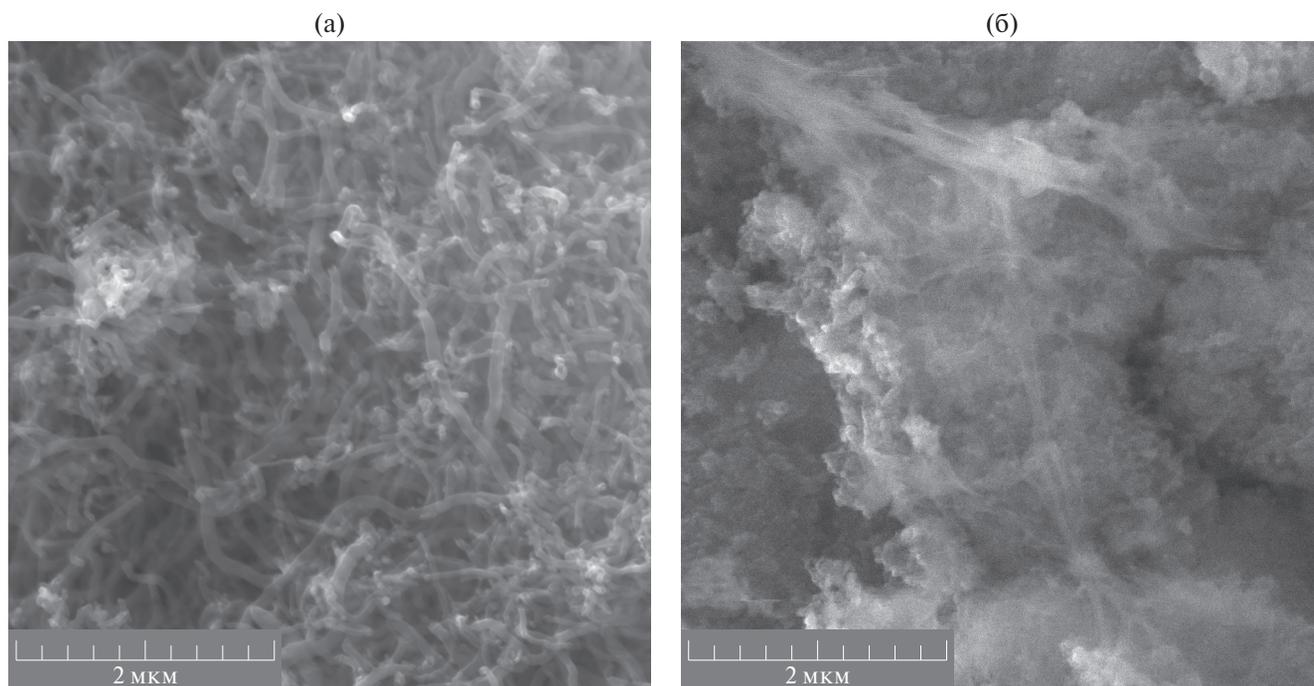


Рис. 2. СЭМ–микрофотографии углеродных нанотрубок марки “ДЕАЛТОМ” в исходном состоянии (а) и электрода из УНТ (б).

позволит минимизировать потери радиоизотопа при изготовлении электрода, а также исключить выщелачивание радиоизотопа из электрода.

Изготовленные электроды из УНТ имели диаметр 9 мм и толщину 1.2 мм. Содержание полимерного связующего в электроде после сушки составило 15 мас. %. Удельная площадь электрода из УНТ составила $55 \text{ м}^2/\text{г}$. Методом ВН было определено, что основной вклад в удельную поверхность электрода вносят мезопоры со средним диаметром пор 13.5 нм . На рис. 26 представлена микрофотография поверхности излома электрода, на которой видны тонкие нити (фибриллы) из фторопласта, обеспечивающие механическое связывание углеродного материала.

Удельное электрическое сопротивление электрода из УНТ составило 10.7 мОм м .

Выбор состава электролита проводился с учетом дальнейшего применения в самозаряжающемся СК. Особенность работы такого устройства заключается в ионизации электролита. Поэтому необходимо обеспечить достаточное количество ионной жидкости и оптимальное значение электропроводности. Обычно максимум электропроводности находится в 40–60%-ной ионной жидкости с пропиленкарбонатом [11]. Учитывая эти особенности, выбрано объемное

соотношение 3:1 ионной жидкости с пропиленкарбонатом.

Электропроводность электролита составила 4.7 мСм/см , при содержании примесной воды 423 ppm .

Циклическая вольтамперометрия

Исследование показало, что при малой скорости развертки (3 мВ/с) наблюдается прямоугольная форма кривой (рис. 3). Такая форма кривой характерна для двойного электрического слоя. С увеличением скорости развертки

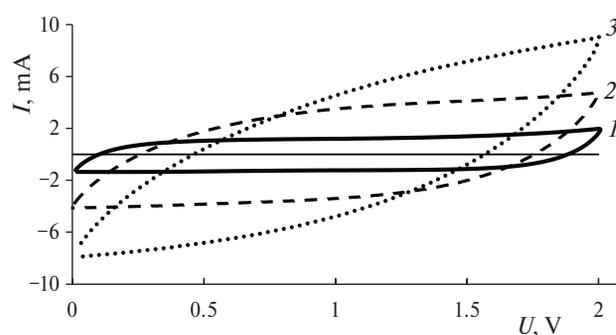


Рис. 3. Циклические вольтамперограммы ячейки с электродами из УНТ “ДЕАЛТОМ”. Скорость развертки, мВ/с: 3 (1), 10 (2), 25 (3).

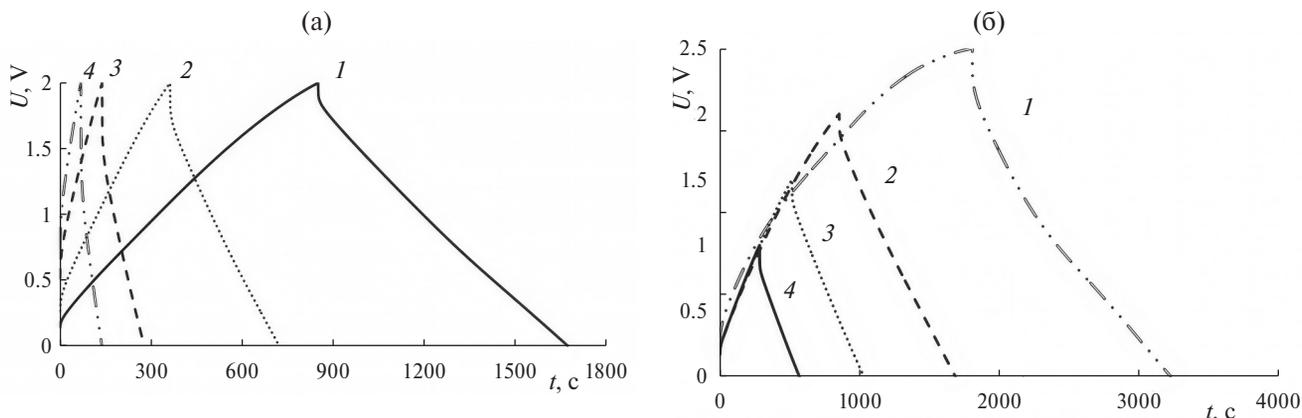


Рис. 4. Гальваностатические кривые ячейки при заряде–разряде током, мА: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 6 в диапазоне напряжений от 0 до 2 В (а); при заряде-разряде током 1 мА (б) в диапазоне напряжений от 0 до 1 В (1), 1.5 В (2), 2 В (3), 2.5 В (4).

(10 мВ/с, 25 мВ/с) наблюдается отклонение от прямоугольной формы, что свидетельствует об ухудшении миграционной способности ионов электролита и, как следствие, ухудшении условий образования двойного электрического слоя.

Гальваностатический заряд-разряд

На рис. 4а представлены гальваностатические заряд-разрядные кривые ячейки в диапазоне напряжений от 0 до 2 В. Форма кривых свидетельствует о емкостном поведении ячейки. Используя выражения (2) и (3), определена зависимость удельной емкости электрода из УНТ от величины тока заряда-разряда (рис. 5–1). С увеличением тока заряда-разряда до 6 мА снижение удельной емкости электрода составило 49.5%. Подобным образом, как в работе [6], исследована зависимость емкости электродов от приложенного напряжения методом гальваностатического заряда-разряда (рис. 4б). Гальваностатические кривые снимали при заряде-разряде током

$I_{з-р} = 1$ мА. Кривые имеют симметричный вид при заряде-разряде от 0 до 1.0–2.0 В, что указывает на емкостное поведение ячейки. При заряде-разряде до 2.5 В симметричность кривой нарушается, возможно, вследствие увеличения внутреннего сопротивления.

Рассчитанные значения удельной емкости в зависимости от приложенного напряжения представлены на рис. 5 – 2.

Импедансная спектроскопия

Результатом исследования методом импедансной спектроскопии представлена диаграмма Найквиста на рис. 6. Спектр делится на 2 части: полукруг в области высоких частот, отвечающий за процесс переноса заряда на границе электрод/электролит, и наклонная кривая в низкочастотной области с плавно изменяющимся наклоном от 45°С до 60°С, которая определяет диффузию ионов внутри электрода [6].

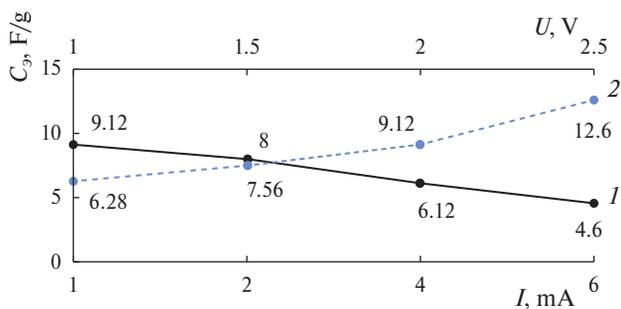


Рис. 5. Зависимость удельной емкости электрода из УНТ от увеличения тока заряда-разряда в диапазоне напряжений от 0 до 2 В (1) и от приложенного напряжения при токе $I_{з-р} = 1$ мА (2).

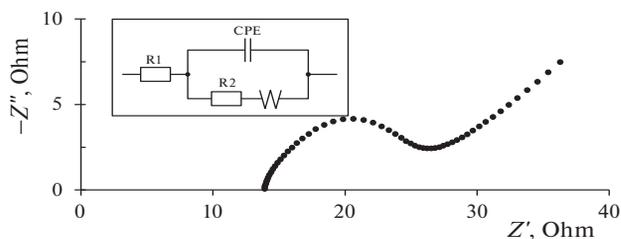


Рис. 6. Диаграмма Найквиста ячейки с электродами из УНТ “ДЕАЛТОМ”. На врезке – электрическая эквивалентная схема ячейки.

Полученный спектр был проанализирован с использованием электрической эквивалентной схемы Рэндлса (врезка на рис. 6). Сопротивление R_1 соответствует эквивалентному последовательному сопротивлению контактов ячейки, сопротивление R_2 соответствует сопротивлению переноса заряда в двойном электрическом слое, представленном элементом CPE . Значения R_1 и R_2 составляют 14 и 13 Ом соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведена отработка технологии изготовления электродов суперконденсатора из углеродных нанотрубок методом многоступенчатого каландрирования полимер-углеродной массы. Отработка технологии проводилась с целью дальнейшего применения при изготовлении углеродных электродов самозаряжающихся суперконденсаторов. В работе использовались многослойные углеродные нанотрубки промышленного производства, полученные методом низкотемпературного каталитического пиролиза углеводородов, с удельной площадью поверхности $109.6 \text{ м}^2/\text{г}$. Изготовленные электроды из углеродных нанотрубок обладали удельной площадью поверхности $55 \text{ м}^2/\text{г}$. Электрохимические характеристики полученных электродов исследованы методами циклической вольтамперометрии, гальваностатического заряда-разряда и импедансной спектроскопии. В качестве электролита использовали ионную жидкость 1-бутил-3-метилимидазолий трифторметансульфонат с пропиленкарбонатом в объемном соотношении 3:1. Исследования показали емкостное поведение экспериментальной ячейки, а рассчитанное значение удельной емкости электрода из углеродных нанотрубок составило 9.1 Ф/г и является низким в сравнении с литературными данными [6, 7], где использовали активированный уголь в качестве основного углеродного материала. Низкое значение удельной емкости электрода может быть обусловлено малой площадью поверхности электрода. Одним из путей повышения площади поверхности электрода следует рассматривать оптимизацию количества полимерного связующего в его составе. Предполагается, что метод многоступенчатого каландрирования пригоден для использования при изготовлении электродов самозаряжающихся суперконденсаторов и позволит минимизировать потери радиоактивного материала, а также исключить выщелачивание радионуклидов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Conway, B. E., *Electrochemical Supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*, N. Y.: Plenum Publ., 1999, p. 698.
2. Иванов, А.М., Герасимов, А.Ф. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя. *Электричество*. 1991. Т.1. С. 16. [Ivanov, A.M. and Gerasimov, A.F., Molecular energy storage devices based on electrical double layer, *Russ. J. Electric.*, 1991, vol. 1, p. 16.]
3. Рисованный, В.Д., Булярский, С.В., Марков, Д.В., Синельников, Л.П., Николкин, В.Н., Злоказов, С.Б., Джанелидзе, А.А., Светухин, В.В. Суперконденсатор и способ его изготовления, *Пат.* 2668544 (Россия), 2018. [Risovanyj, V.D., Bulyarskij, S.V., Markov, D.V., Sinelnikov, L.P., Nikolkin, V.N., Zlokazov, S.B., Dzhanelidze, A.A., and Svetukhin, V.V., Supercapacitor and its manufacturing method, *Patent* 2668544 (Russia), 2018.]
4. Рисованный, В.Д., Костылев, А.И., Душин, В.Н., Фирсин, Н.Г., Синельников, Л.П., Бутаков, Д.С., Николкин, В.Н. Атомные батареи конденсаторного типа нового поколения с жидким электролитом. *Атомная энергия*. 2022. Т. 132. С. 175. [Risovanyj, V.D., Kostylev, A.I., Dushin, V.N., Firsin, N.G., Sinelnikov, L.P., Butakov, D.S., and Nikolkin, V.N., New generation atomic batteries of capacitor type with liquid electrolyte, *Russ. J. Atomic energy*, 2022, vol. 132, p. 175.]
5. Signorelli, R., Ku, D.C., Kassakian, J.G., and Schindall, J.E., Electrochemical Double-Layer Capacitors Using Carbon Nanotube Electrode Structures, *IEEE*, 2009, vol. 97, no. 11. p. 1837.
6. Чернявина, В. В., Бережная, А. Г., Жихарева, Е.А. Активированный уголь марки “NORIT В Test EUR” как электродный материал суперконденсатора. *Электрохим. энергетика*. 2018. Т. 18. № 4. С. 192. [Chernyavina, V.V., Berezhnaya, A.G., and Zhikhareva, E.A., Activated carbon “NORIT В Test EUR” as an electrode material for supercapacitors, *Russ. J. Electrochemical Energetics*, 2018, vol. 18, no. 4, p. 192.]
7. Чайка, М.Ю., Воробьев, А.Ю., Силютин, Д.Е., Небольсин, В.А. Разработка лабораторного технологического маршрута изготовления нанопористых электродов суперконденсаторов. *Вестник ВГУ*. 2012. Т. 7, № 2. С. 79. [Chayka, M.Yu., Vorobjev, A.Yu., Silyutin, D.E., and Nebolsin, V.A., Development of the laboratory technological route for supercondensers nanoporous electrodes manufacturing, *Russ. J. Vestnik VSU*, 2012, vol. 7, no. 2, p. 79.]

8. Янилкин, И.В., Саметов, А.А., Школьников, Е.И. Влияние количества связующего фторопласта Ф4 в угольных электродах на характеристики суперконденсаторов. *Журн. прикл. химии*. 2015. Т. 88. №2. С. 336. [Yanilkin, I.V., Sametov, A.A., and Shkol'nikov, E.I., Impact of F-4 fluoroplast in carbon electrodes on the supercapacitors characteristics, *Russ. J. applied chemistry*, 2015, vol. 88, no. 2. p. 336.]
9. Lalitha, M. and Lakshmi pathi, S., Interface energetics of [Emim]⁺[X]⁻ and [Bmim]⁺[X]⁻ (X = BF₄, Cl, PF₆, TfO, Tf₂N) based ionic liquids on graphene, defective graphene, and graphyne surfaces, *J. Molecular liquids*, 2017, vol. 236, p. 124.
10. Lam, P.H., Tran, A.T., Walczyk, D.J., Miller, A.M., and Yu, L., Conductivity, viscosity, and thermodynamic properties of propylene carbonate solutions in ionic liquids, *J. Molecular liquids*, 2017, vol. 246, p. 215.
11. Di Leo, R.A., Marschlok, A.C., Takeuchi, K.J., and Takeuchi, E.S., Battery electrolytes based on saturated ring ionic liquids: Physical and electrochemical properties, *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 109, p. 27.
12. Pitawela, N.R. and Shaw, S.K., Imidazolium triflate ionic liquid's capacitance–potential relationships and transport properties affected by cation chain lengths, *ACS Meas. Sci*, 2021, vol. 1, p. 117.