

УДК 620.17, 538.95

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-58-65

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ТЕПЛОЭЛЕКТРОНАКОПИТЕЛЯ

А.С. Устинов, Е.А. Питухин

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: anton-ustinov@psu.karelia.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 23.12.19, принята к печати 17.01.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Устинов А.С., Питухин Е.А. Исследование энергетических характеристик углеродосодержащего композитного материала теплоэлектронакопителя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 58–65. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-58-65

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проведены исследования энергетических характеристик углеродосодержащего композитного материала теплоэлектронакопителя. Предложен состав и технология получения композитного материала теплоэлектронакопителя. Исходные компоненты накопителя включают микропорошок графита, жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  и отвердитель — натрий кремнефтористый  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . Рассмотрены перспективы использования разработанного теплоэлектронакопителя. **Методы.** Исследования состава образцов композитного материала проводились методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии. Характеристики материала определялись теплофизическим и электрофизическими методами. **Основные результаты.** Получены образцы углеродосодержащего композитного материала. Разработана технологическая оснастка теплоэлектронакопителя. Получены частотные зависимости импеданса опытных образцов теплоэлектронакопителя, их вольт-амперные характеристики. Исследованы температурные зависимости электроемкости и диэлектрической проницаемости опытных образцов теплоэлектронакопителя в диапазоне 20–60 °С. Получены температурные зависимости удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности при монотонном нагреве. **Практическая значимость.** Разработанный теплоэлектронакопитель может применяться в системах аварийного освещения и отопления, энергоснабжения при работе в режиме постоянного или компенсационного подзаряда (частное, административное домостроение). Разработанный материал можно применять в датчиках температуры.

### Ключевые слова

теплоэлектронакопитель, электрическая и тепловая энергия, углерод, жидкое стекло, твердый электролит, диэлектрическая проницаемость, импеданс

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-58-65

## ENERGY CHARACTERISTICS OF CARBON-BASED COMPOSITE HEAT ELECTRIC STORAGE

A.S. Ustinov, E.A. Pitukhin

Petrozavodsk State University, (PetrSU), Petrozavodsk, 185910, Russian Federation  
 Corresponding author: ustinov@psu.karelia.ru

### Article info

Received 23.12.19, accepted 17.01.20  
 Article in Russian

**For citation:** Ustinov A.S., Pitukhin E.A. Energy characteristics of carbon-based composite heat electric storage. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 58–65 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-58-65

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents energy characteristics study of a carbon-containing composite material of a heat and power storage unit. We propose the composition and composite material technology for the heat and power storage unit. The initial components of the storage include graphite micro-powder,  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  water glass and a solidifier,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , sodium silicofluoride. The applicability of the developed heat and power storage unit is considered. **Methods.** The composition of composite material samples was studied by x-ray diffraction analysis and electron

microscopy. Material characteristics were determined by thermophysical and electrophysical methods. **Main Results.** Samples of carbon-containing composite material are obtained. Engineering facilities of the heat and power storage unit are developed. Impedance frequency dependences of the heat electric storage unit experimental samples and their volt-ampere characteristics are obtained. The temperature dependences of electrical capacity and dielectric permittivity of the heat electric storage unit experimental samples are studied in the range of 20–60 °C. The temperature dependences of the specific heat capacity and the thermal conductivity coefficient for monotonous heating are obtained. **Practical Relevance.** The developed heat and power storage unit can be used in emergency lighting and heating systems and power supply when operating in the mode of constant or compensatory charging (private and administrative house construction). The developed material is applicable in temperature sensors.

#### Keywords

heat electric storage, electric and thermal energy, carbon, water glass, solid electrolyte, dielectric permittivity, impedance

### Введение

В последние десятилетия возник большой интерес к разработке и усовершенствованию более эффективных устройств хранения энергии. Одними из таких устройств являются суперконденсаторы. Их работа основана на тех же фундаментальных законах, что и у обычных конденсаторов, но для достижения большей емкости используется наибольшая площадь поверхности электродов. Это позволяет получить плотность энергии больше, чем у обычных конденсаторов, и плотность мощности больше, чем у аккумуляторов.

Суперконденсаторы, также известные как ультраконденсаторы (иногда под этим понимаются в частности электрохимические конденсаторы (ЭК) или ионисторы) используют большую площадь поверхности материалов электрода для достижения емкости на несколько порядков величины больше, чем у обычных конденсаторов [1–5]. Однако процесс разработки и исследования суперконденсаторов находится в начальной стадии и будет продолжаться, так как, несмотря на полученные большие емкости по сравнению с обычными конденсаторами, они еще не соответствуют плотностям энергии среднего и высокого класса аккумуляторов и топливных элементов. Главным недостатком суперконденсаторов является их высокая цена.

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются перспективными новыми материалами для электродов электрохимических накопителей и устройств преобразования энергии (аккумуляторов) с исключительно быстрыми скоростями заряда-разряда благодаря их уникальным внутренним структурам, большой площади поверхности, низкой плотности, высокой химической стабильности и электронной проводимости [6]. Использование УНТ для конструкции электродов суперконденсатора позволяет повысить плотность мощности и производительность суперконденсаторов относительно обычных диэлектрических конденсаторов. При этом высокая плотность мощности требует низкого электрического сопротивления между электродами и контактными токоприемниками.

В работе [7] описано использование бескорпусных, легких ( $0,75 \text{ мг/см}^2$ ), ультратонких (менее 200 мкм), с высокой проводимостью (55 См/см) и гибких трехмерных 3D-графеновых суперконденсаторов, наполненных  $\text{MnO}_2$ .

Разработка данного гибкого аккумулирующего суперконденсатора требует оптимизации доли  $\text{MnO}_2$  по отношению ко всему электроду, для достижения максимальной удельной емкости.

Имеется оборудование, которое требует накопления высокой плотности энергии, чтобы обеспечить длительный срок службы, а также высокую энергоемкость для удовлетворения высокого потребления тока, необходимую для передачи данных по беспроводной связи. Примеры такого оборудования: портативное телекоммуникационное оборудование и автоматические сейсмодатчики (UGS) [8–10]. Анализ технических решений в рассмотренных работах не позволяет реализовать простую технологию создания теплоэлектронакопителя.

Известен сорбционный способ аккумулирования тепловой энергии на основе гигроскопических солей и их гидратов с применением многостенных углеродных нанотрубок [11]. Недостатки данного метода: невысокая емкость аккумулирования и значительные потери на этапе хранения тепловой энергии.

Таким образом, задачи по созданию и усовершенствованию технологий изготовления материалов теплоэлектронакопителей, подбору и оптимизации электродов и используемого электролита, по улучшению взаимодействия между электролитом и электродом и т. д. являются нерешенными. В связи с важностью поставленных задач авторами сформулированы основные цели исследования: разработка состава и технологии получения материала, способного накапливать тепловую и электрическую энергию, и дальнейшее применение его в качестве материала теплоэлектронакопителя в системах энергоснабжения для эффективного использования источников энергии, в устройствах преобразования и хранения энергии.

### Состав и технология получения углеродосодержащего композитного материала для теплоэлектронакопителя

Использование графита в качестве активных частиц, которые накапливают заряд, является перспективным. При этом использование спектрально чистого порошка графита с микронным размером частиц обеспечивает большую поверхность смачивания и площади фазового контакта с твердым электролитом, что должно способствовать уменьшению скорости саморазряда теплоэлектронакопителя.

Состав материала теплоэлектронакопителя получен следующим образом:

1) первоначально получали микропорошок графита с размером частиц 1–10 мкм путем помола исходных заготовок графита на лабораторной планетарно-центрической мельнице ГЕФЕСТ-2;

2) микропорошок графита тщательно перемешивали со стеклосвязкой — жидкое натриевое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  с силикатным модулем  $n = 2,8$  в соотношении массовых долей 1:1;

3) к полученной микрокомпозиции добавляли отвердитель — кремнефтористый натрий  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  в соотношении массовых долей 10:1.

Полученная смесь образует коллоидный раствор (или золь), так как входящие вещества находятся в виде частиц более крупных, чем отдельные атомы, молекулы или ионы. Затем, по мере укрупнения частиц в виде студенистой массы, образуется гель.

В состав раствора жидкого стекла входят коллоидные частицы двуокиси кремния золя состава  $(n\text{SiO}_2)$  и молекулы оксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). При изменении внешних условий (температуры, давления и т. д.) или концентрации раствора отдельные частицы раздробленного вещества могут перейти из состояния, соответствующего истинному раствору, в состояние, соответствующее коллоидному, и наоборот. Полуколлоидные растворы склонны к полимеризации, при которой из отдельных молекул одного и того же вещества образуются более сложные частицы с увеличенным молекулярным весом. Полимеризация означает «присоединение себе подобных». Полимер типа  $n\text{SiO}_2$  образует двуокись кремния, где атомы кремния соединяются между собой посредством атома кислорода [12].

Таким образом, при смешивании исходных составляющих происходит активация графита на границе графит-электролит. В результате с помощью простой технологии изготовления получен композитный материал (КМ) теплоэлектронакопителя. Образцы получали путем свободного твердения (полимеризации) данной смеси при комнатной температуре.

Выполненные исследования структурного состава образцов КМ методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии показали, что образцы КМ многофазны. Фаза графита принадлежит гексагональному графиту. Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  находится в кристаллическом состоянии  $\alpha$ -кварц. Также присутствует аморфный диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Кроме этого, виден фторид натрия  $\text{NaF}$  в виде кристаллов. Присутствие фазы натрия кремнефтористого  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  в кристаллическом виде показывает, что химическая реакция взаимодействия между  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  и жидким стеклом  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  прошла не полностью.

### Опытные образцы теплоэлектронакопителя

Технологическая оснастка теплоэлектронакопителя представляет собой пронумерованные алюминиевые корпуса, а также алюминиевые и медные электроды.

Рассмотрены две технологические оснастки изготовления опытных образцов теплоэлектронакопителя:

1) цилиндрической конфигурации — заполненные КМ алюминиевые корпуса с прикрепленными провололочками-токосъемниками, а также загерметизированные с помощью герметика сверху (рис. 1, а);

2) плоской конфигурации — две алюминиевые пластинки с припаянными к ним токосъемниками (рис. 1, б).

С помощью двух разновидностей технологических оснасток изготовлены опытные образцы в виде плоских и цилиндрических теплоэлектронакопителей (рис. 2).

### Энергетические характеристики опытных образцов теплоэлектронакопителя

В рамках работы проведены исследования теплофизических характеристик КМ теплоэлектронакопителя: огнестойкости, коэффициента теплопроводности и теплоемкости, а также измерения прочностных свойств.

Результаты исследования огнестойкости КМ теплоэлектронакопителя показали, что предельное состояние по потере теплоизолирующей способности для образца толщиной 20 мм наступает через 15 мин после начала теплового воздействия<sup>1</sup>. При этом измеряемая температура на необогреваемой поверхности за рассматриваемый промежуток времени не достигла 220 °С, что соответствует предельному состоянию по потере теплоизолирующей способности И15. Следовательно, исследуемый КМ теплоэлектронакопителя способен сохранять несущие и ограждающие функции при повышенных тепловых нагрузках. Тем самым подтверждается его огнестойкость [13].

Методом термогравиметрии было установлено, что при 900 °С КМ теплоэлектронакопителя утрачивает массу и со временем разрушается вследствие достижения температуры плавления одного из его компонентов [14].

Значение коэффициента теплопроводности в температурном диапазоне 20–400 °С находится в пределах 0,85–1,2 Вт/(м·К). Значение удельной теплоемкости в данном диапазоне возрастает по логарифмическому закону от 700 до 1200 Дж/(кг·К) [15, 16].

Важной характеристикой, определяющей прочностные свойства КМ теплоэлектронакопителя, является адгезия. Адгезия имеет большое значение для подтверждения пригодности КМ в качестве покрытия и определения способа нанесения КМ теплоэлектронакопителя на различные поверхности. Для исследования процессов, происходящих при смешении графита с жидким стеклом в присутствии отвердителя, проводились механические испытания КМ теплоэлектронакопителя с целью определения нагрузки, необходимой для отрыва испытываемого покрытия от поверхности основания. Готовая композиция наносилась на деревянные образцы (толщина слоя 2 мм). После полного высыхания образцы разрывали, определяя нагрузку в момент разрыва покрытия с точностью 10 Н/м<sup>2</sup>. Нагрузка на образец прикладывалась путем подвешивания груза на приспособления — крючки (рис. 3, а). Разрушение образцов происходило по границе КМ и деревянных образцов в продольном сечении. Трещины в образцах не образовывались. Предельное зафиксированное значение нагрузки на отрыв составило 1,22 МПа [17].

Снимки поверхности образцов КМ с помощью электронного микроскопа Hitachi SU 1510 (рис. 3, б, в)

<sup>1</sup> ИСО 834-75. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. Введен. 01.01.1996.

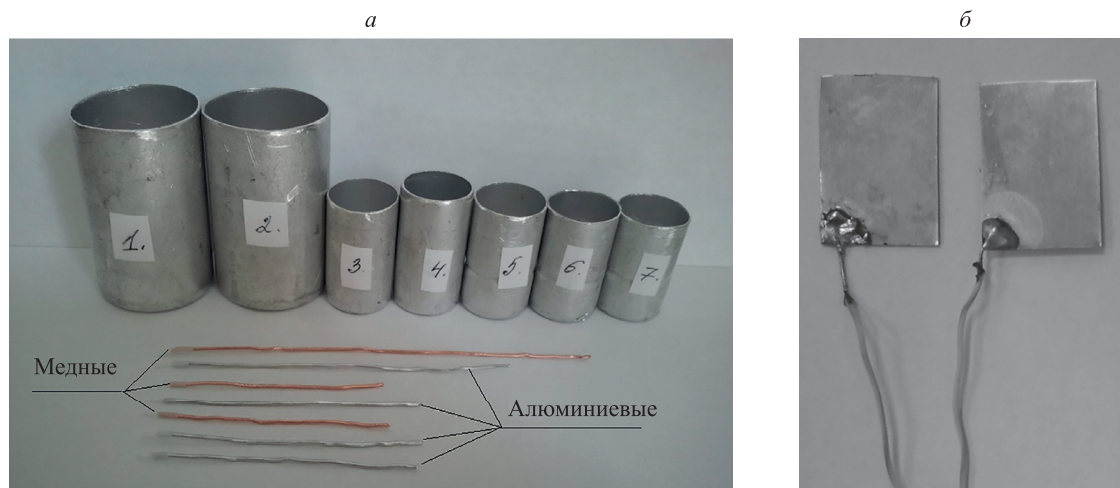


Рис. 1. Технологическая оснастка для изготовления образцов: цилиндрическая конфигурация термоэлектронакопителя (а); плоская конфигурация (б)

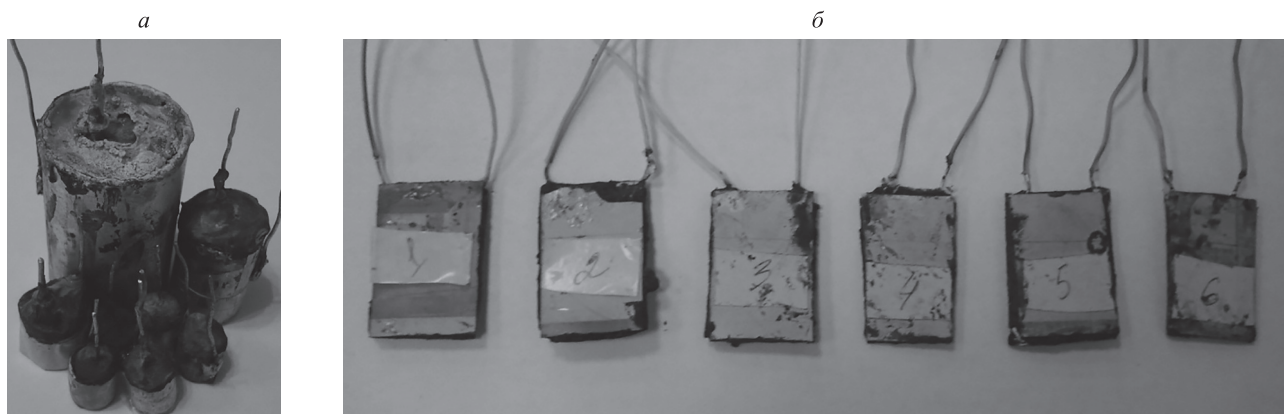


Рис. 2. Образцы термоэлектронакопителя: цилиндрической (а) и плоской (б) конфигураций

подтвердили, что частицы графита имеют размерность несколько микрометров. Структура поверхности хорошо просматривается.

Исследование электрофизических характеристик опытных образцов термоэлектронакопителя заключалось в измерении частотной зависимости импеданса (полного сопротивления), температурных зависимостей емкости и диэлектрической проницаемости.

Для проведения измерений использовались следующие приборы:

- универсальный мультиметр Keithley Model 2010 HighVoltage;
- источник-измеритель Keithley Model 2400 Low Voltage SourceMeter Instrument;
- измеритель параметров иммитанса 7600 Plus Precision LCR Meter фирмы QuadTech, так как они по-

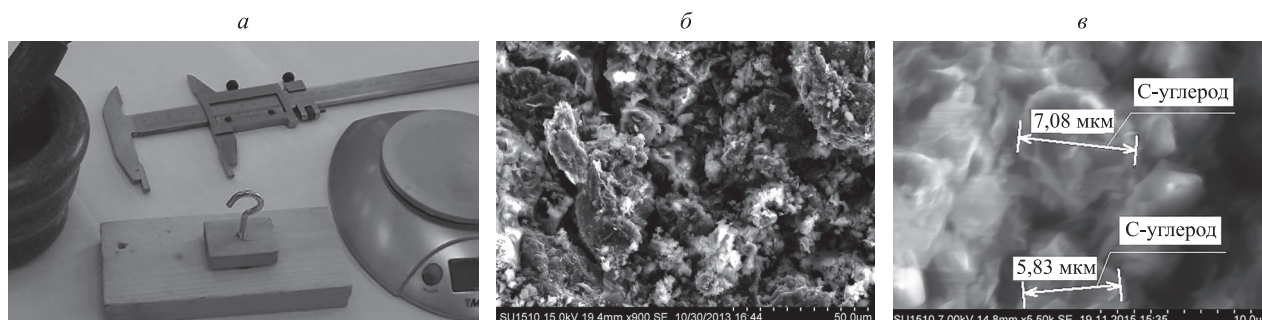


Рис. 3. Приспособления для определения нагрузки для отрыва покрытия и снимки разрывной поверхности после эксперимента (электронный микроскоп Hitachi SU 1510): деревянные приспособления (общий вид) (а); микрофотография поверхности отрыва в масштабах 50 мкм (б) и 10 мкм (в)

звolyют изучать необходимые характеристики в наиболее расширенном диапазоне и имеют большую точность. Для нагрева образцов использовался термофен паяльной станции.

Проведено исследование частотной зависимости импеданса опытных образцов теплоэлектронакопителя с помощью измерителя параметров. Зависимость импеданса  $Z$  от частоты  $f$  в диапазоне от 10 до 2 МГц представлена в логарифмических координатах (рис. 4).

Вид частотной зависимости импеданса подтверждает емкостной характер накопителя, сопротивление уменьшается с увеличением частоты [18].

Получена вольт-амперная характеристика (ВАХ) опытных образцов теплоэлектронакопителя (рис. 5), которая показывает, что существует несколько участков, которые определяют зависимость тока зарядки от подаваемого напряжения:

- до напряжения ( $U$ ) 7 В (соответствует силе тока ( $I$ ) 10 мА) идет более быстрый процесс зарядки накопителя;
- при подаче напряжения более 7 В (ток более 10 мА) скорость зарядки уменьшается.

Таким образом, ВАХ накопителя аналогична ВАХ конденсатора при накоплении заряда [18].

Одной из возможных областей применения разработанного материала теплоэлектронакопителя является использование его в качестве термочувствительного элемента. В результате работы был синтезирован КМ, на основе которого можно изготавливать датчики температуры, использующие изменение электроемкости от температуры. Получена зависимость электрической емкости опытных образцов теплоэлектронакопителя от температуры в диапазоне 22–60 °С в режиме монотонного нагрева с использованием термофена паяльной станции. Образцы теплоэлектронакопителя по мере нагрева увеличивают свою электрическую емкость, после нагревания сохраняют свои свойства и при окончательном остывании возвращаются в исходное состояние. Установлено, что электроемкость изменяется от  $C_{t_1} = 17$  мкФ до  $C_{t_2} = 32$  мкФ при его нагревании от  $t_1 = 22$  °С до  $t_2 = 60$  °С, а при остывании зависимость повторяется (рис. 6). Рассчитанный по формуле [18] температурный коэффициент электроемкости  $\alpha_{C_t}$ :

$$\alpha_{C_t} = \frac{C_{t_2} - C_{t_1}}{C_{t_1}(t_2 - t_1)}$$

составил величину 2,2 %/°С.

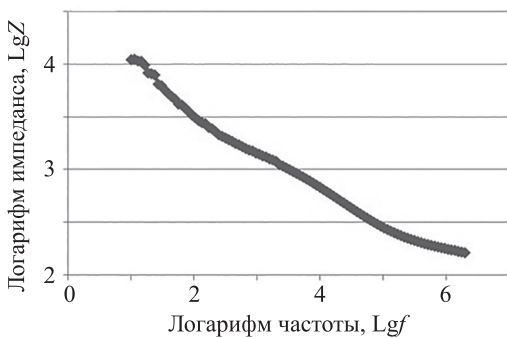


Рис. 4. Логарифмическая зависимость импеданса от частоты

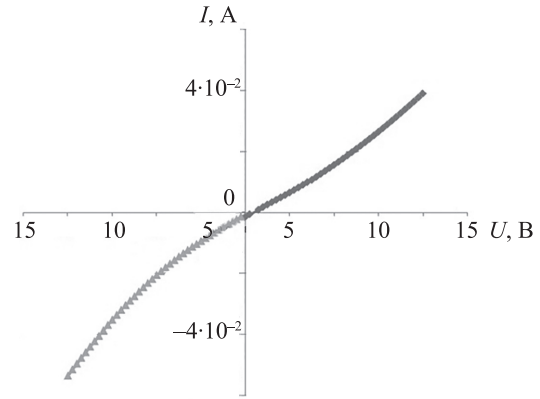


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика образцов теплоэлектронакопителя

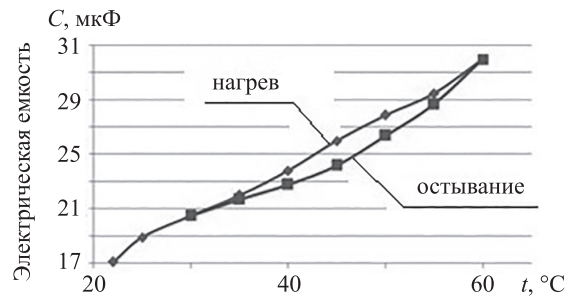


Рис. 6. Температурная зависимость электроемкости

Для измерения температуры 20 °С с точностью 1 °С необходимо осуществлять изменение электроемкости с точностью 0,4 мкФ.

Часть образцов была изготовлена в виде плоских конденсаторов размерами (20 × 30 × 1 мм) со значениями емкости порядка  $\Delta C = 1$  мкФ. Расчетное изменение диэлектрической проницаемости  $\Delta \epsilon$  [18]:

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta C d}{\epsilon_0 S},$$

при нагревании от 22 до 60 °С дает результат величины порядка  $10^7$ .

Здесь  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $S$  — площадь обкладок;  $d$  — расстояние между ними.

На основе полученной типичной зависимости электрической емкости опытных образцов теплоэлектронакопителя в диапазоне температур 22–60 °С построена температурная зависимость диэлектрической проницаемости (рис. 7). Как видно из рисунка, значение ди-

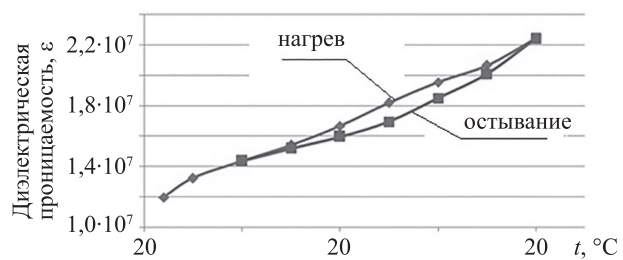


Рис. 7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

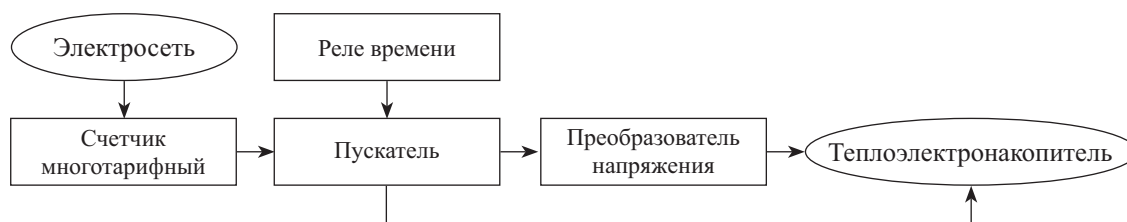


Рис. 8. Устройство теплоэлектронакопителя

электрической проницаемости составляет примерно  $2,2 \cdot 10^7$ .

Степень миниатюризации в микроэлектронике определяется диэлектрической проницаемостью. Имея в распоряжении вещество с большим значением диэлектрической проницаемости можно добиться существенного увеличения емкости конденсатора при его неизменных размерах.

На роль такого вещества могли бы претендовать сегнетоэлектрики — диэлектрики со спонтанной поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля. У них диэлектрическая проницаемость (сегнетова соль) достигает порядка  $10^4$ , но она сильно зависит от температуры. Выше определенной температуры («температуры Кюри») диэлектрическая проницаемость вещества резко уменьшается [18].

Керамика  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (ССТО) не является сегнетоэлектриком. Проницаемость этой керамики при комнатной температуре составляет порядка  $10^5$  и остается постоянной в диапазоне температур 100–600 К. Диэлектрическая проницаемость ССТО сильно уменьшается в присутствии высокочастотного переменного электрического поля — с  $10^5$  до  $10^2$  при частоте поля 1 ГГц. В 2008 году была получена керамика  $\text{La}_{15/8}\text{Sr}_{1/8}\text{NiO}_4$  с диэлектрической проницаемостью порядка  $10^6$  и при частоте поля 1 ГГц [19].

Для эффективного увеличения емкости конденсатора, кроме проблемы температурной зависимости диэлектрической проницаемости, остается нерешенной и проблема ее частотной зависимости. Таким образом, остро стоит проблема поиска вещества, которое будет слабо менять свою диэлектрическую проницаемость с частотой.

Предложенные авторами характеристики КМ теплоэлектронакопителя превысили все известные и описанные в литературе вещества, что подтверждает возможность создания теплоэлектронакопителя на основе углерода.

### Теоретический расчет на основе теплофизических характеристик образцов теплоэлектронакопителя

Используя значения характеристик экспериментальных образцов теплоэлектронакопителя, выполнен теоретический расчет предполагаемого готового изделия (рис. 8).

При теплообмене происходит изменение внутренней энергии тела, мерой изменения которой при теплообмене является количество теплоты. Так как материал

накопителя обладает удельной теплоемкостью, то можно рассчитать количество теплоты по формуле [18]:

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T, \quad (1)$$

где  $Q$  — количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой  $m$  от температуры  $T_1$ , до температуры  $T_2$ ;  $c$  — удельная теплоемкость вещества.

Запас величины количества теплоты, рассчитанной по формуле (1), составит 47 МДж при используемом теплоэлектронакопителе объемом  $1 \text{ м}^3$  при нагревании его от 20 до 60 °С и плотности полученного КМ  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  [13].

При использовании в качестве источника тепловой энергии теплоэлектронагревателя мощностью  $P = 10 \text{ кВт}$  для нагревания теплоэлектронакопителя от 20 до 60 °С и аккумуляции тепловой энергии 47 МДж потребуется время 1,3 ч.

Для теплоэлектронакопителя объемом  $1 \text{ м}^3$  при изменении температуры 20–60 °С изменение емкости составляет  $\Delta c = 1 \text{ Ф}$ . Накопленный заряд при напряжении  $U = 20 \text{ В}$  и силе тока  $i = 40 \text{ мА}$  за  $\tau = 8,3 \text{ мин}$  [18]:

$$q = \Delta c U$$

составит величину 20 Кл.

При использовании в качестве нагрузки матрицы светодиодов с током нагрузки  $I = 10 \text{ мА}$  расчетное время работы теплоэлектронакопителя при отключенном источнике зарядки [18]:

$$\tau = \frac{q}{I}$$

составит  $\tau = 34 \text{ мин}$ .

### Заключение

В процессе работы проведено исследование возможности создания теплоэлектронакопителя. Выполненный обзор и анализ литературы показали возможность и перспективность создания и использования теплоэлектронакопителя на основе углеродосодержащего композитного материала. Предложен состав и технология получения композитного материала теплоэлектронакопителя, исходные компоненты которого включают микропорошок графита, жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  и отвердитель — натрий кремнефтористый  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . Экспериментально получены технологическая оснастка и образцы теплоэлектронакопителя на основе углеродосодержащего композитного материала.

В ходе исследований теплофизических характеристик композитного материала теплоэлектронакопителя было установлено, что предел огнестойкости материала соответствует П15 по потере теплоизолирующей способности. При достижении 900 °С материал теплоэлектронакопителя утрачивает массу и со временем разрушается вследствие достижения температуры плавления одного из его компонентов. Значение коэффициента теплопроводности в температурном диапазоне 20–400 °С находится в пределах 0,85–1,2 Вт/(м·К). Значение удельной теплоемкости в этом же диапазоне возрастает по логарифмическому закону от 700 до 1200 Дж/(кг·К). Предельное зафиксированное значение нагрузки на отрыв составило 1,22 МПа.

Проведенные исследования частотной зависимости импеданса опытных образцов теплоэлектронакопителя показали, что в диапазоне от 10 Гц до 2 МГц накопитель носит емкостной характер, при этом сопротивление уменьшается с увеличением частоты. Вольт-амперная характеристика показала, что существует несколько участков, которые определяют зависимость тока зарядки от подаваемого напряжения: до напряжения 7 В (соответствует силе тока 10 мА) идет более быстрый процесс зарядки накопителя, а при подаче напряжения более 7 В (ток более 10 мА) скорость зарядки уменьшается. Таким образом, определено, что вольт-амперная характеристика накопителя аналогична

вольт-амперной характеристике конденсатора при накоплении заряда. Установлено, что электроемкость изменяется от 17 до 32 мкФ при его нагревании в диапазоне 22–60 °С, а при остывании зависимость повторяется. Диэлектрическая проницаемость опытных образцов теплоэлектронакопителя составила порядка 10<sup>7</sup>.

В работе выполнен теоретический расчет теплоэлектронакопителя на основе углеродосодержащего композитного материала. На основе расчета получено:

— количество теплоты, запасенное теплоэлектронакопителем объемом 1 м<sup>3</sup> при нагревании его от 20 до 60 °С;

— время при использовании в качестве источника тепловой энергии заданной мощностью для нагревания его в диапазоне 20–60 °С и аккумулирования расчетной тепловой энергии;

— время работы накопителя при отключенном источнике зарядки при использовании в качестве нагрузки матрицы светодиодов с заданным током нагрузки.

Разработанный теплоэлектронакопитель может применяться в системах аварийного освещения и отопления, энергоснабжения при работе в режиме постоянного или компенсационного подзаряда (частное, административное домостроение), также на основе разработанного композитного материала можно изготавливать датчики температуры.

#### Литература

1. Kim H., Popov B.N. A mathematical model of oxide/carbon composite electrode for supercapacitors // *Journal of the Electrochemical Society*. 2003. V. 150. N 9. P. A1153–A1160. doi: 10.1149/1.1593039
2. Kim I.H., Kim J.H., Kim K.B. Electrochemical characterization of electrochemically prepared ruthenium oxide/carbon nanotube electrode for supercapacitor application // *Electrochemical and Solid State Letters*. 2005. V. 8. N 7. P. A369–A372. doi: 10.1149/1.1925067
3. Du Pasquier A., Plitz I., Menocal S., Amatucci G. A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications // *Journal of Power Sources*. 2003. V. 115. N 1. P. 171–178. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00718-8
4. Li H., Cheng L., Xia Y. A hybrid electrochemical supercapacitor based on a 5 V Li-ion battery cathode and active carbon // *Electrochemical and Solid State Letters*. 2005. V. 8. N 9. P. A433–A436. doi: 10.1149/1.1960007
5. Du C., Yeh J., Pan N. High power density supercapacitors using locally aligned carbon nanotube electrodes // *Nanotechnology*. 2005. V. 16. N 4. P. 350–353. doi: 10.1088/0957-4484/16/4/003
6. Emmenegger Ch., Mauron Ph., Sudan P., Wenger P., Hermann V., Gallay R., Züttel A. Investigation of electrochemical double-layer (ECDL) capacitors electrodes based on carbon nanotubes and activated carbon materials // *Journal of Power Sources*. 2003. V. 124. N 1. P. 321–329. doi: 10.1016/S0378-7753(03)00590-1
7. He Y.M., Chen W.J., Li X.D., Zhang Z.X., Fu J.C., Zhao C.H., Xie E.Q. Freestanding three-dimensional graphene/MnO<sub>2</sub> composite networks as ultralight and flexible supercapacitor electrodes // *ACS Nano*. 2013. V. 7. N 1. P. 174–182. doi: 10.1021/nn304833s
8. Brandhorst H.W., Jr, Chen Z. Achieving a high pulse power system through engineering the battery-capacitor combination // *Proc. 16<sup>th</sup> Annual Battery Conference on Applications and Advances*. 2001. P. 153–156. doi: 10.1109/BCAA.2001.905115
9. Gao L., Dougal R., Liu S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. V. 20. N 1. P. 236–243. doi: 10.1109/TPEL.2004.839784

#### References

1. Kim H., Popov B.N. A mathematical model of oxide/carbon composite electrode for supercapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 9, pp. A1153–A1160. doi: 10.1149/1.1593039
2. Kim I.H., Kim J.H., Kim K.B. Electrochemical characterization of electrochemically prepared ruthenium oxide/carbon nanotube electrode for supercapacitor application. *Electrochemical and Solid State Letters*, 2005, vol. 8, no. 7, pp. A369–A372. doi: 10.1149/1.1925067
3. Du Pasquier A., Plitz I., Menocal S., Amatucci G. A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 2003, vol. 115, no. 1, pp. 171–178. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00718-8
4. Li H., Cheng L., Xia Y. A hybrid electrochemical supercapacitor based on a 5 V Li-ion battery cathode and active carbon. *Electrochemical and Solid State Letters*, 2005, vol. 8, no. 9, pp. A433–A436. doi: 10.1149/1.1960007
5. Du C., Yeh J., Pan N. High power density supercapacitors using locally aligned carbon nanotube electrodes. *Nanotechnology*, 2005, vol. 16, no. 4, pp. 350–353. doi: 10.1088/0957-4484/16/4/003
6. Emmenegger Ch., Mauron Ph., Sudan P., Wenger P., Hermann V., Gallay R., Züttel A. Investigation of electrochemical double-layer (ECDL) capacitors electrodes based on carbon nanotubes and activated carbon materials. *Journal of Power Sources*, 2003, vol. 124, no. 1, pp. 321–329. doi: 10.1016/S0378-7753(03)00590-1
7. He Y.M., Chen W.J., Li X.D., Zhang Z.X., Fu J.C., Zhao C.H., Xie E.Q. Freestanding three-dimensional graphene/MnO<sub>2</sub> composite networks as ultralight and flexible supercapacitor electrodes. *ACS Nano*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 174–182. doi: 10.1021/nn304833s
8. Brandhorst H.W., Jr, Chen Z. Achieving a high pulse power system through engineering the battery-capacitor combination. *Proc. 16<sup>th</sup> Annual Battery Conference on Applications and Advances*, 2001, pp. 153–156. doi: 10.1109/BCAA.2001.905115
9. Gao L., Dougal R., Liu S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 236–243. doi: 10.1109/TPEL.2004.839784

10. Leedy A.W., Nelms R.M. Analysis of a capacitor-based hybrid source used for pulsed load applications // Proc. 37<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). 2002. P. 1–6.
11. Grekova A., Gordeeva L., Aristov Y. Composite sorbents «Li/Ca halogenides inside Multi-wall Carbon Nano-tubes» for Thermal Energy Storage // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. V. 155. P. 176–183. doi: 10.1016/j.solmat.2016.06.006
12. Шехмейстер Е.И., Вассерман Р.Н., Майзель Л.С. Технохимические работы в электривакуумном производстве: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1967. 352 с.
13. Питухин Е.С., Устинов А.С. Исследование предела огнестойкости композитного материала «жидкое стекло – микрочастицы графита» // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 277–283. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-277-283
14. Устинов А.С., Питухин Е.А. Исследование композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» методом термогравиметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 826–833. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833
15. Гостев В.А., Питухин Е.А., Устинов А.С., Яковлева Д.А. Исследование теплозащитных свойств композитного материала жидкое стекло–микрочастицы графита // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3(91). С. 81–87.
16. Устинов А.С., Рогозин С.С., Питухин Е.А. Разработка и реализация математической модели теплового воздействия на ограждающие конструкции, покрытые огнезащитным композитным материалом // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 41–48. doi: 10.18324/2077-5415-2018-3-41-48
17. Устинов А.С. Метод нанесения огнезащитного композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» на поверхности ограждения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1001–1007. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007
18. Немцов М.В., Немцова М.Л. Электротехника и электроника: учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 432 с.
19. Krohns S., Lunkenheimer P., Kant Ch., Pronin A.V., Brom H.B., Nugroho A.A., Diantoro M., Loidl A. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature // Applied Physics Letters. 2009. V. 94. N 12. P. 122903. doi: 10.1063/1.3105993
10. Leedy A.W., Nelms R.M. Analysis of a capacitor-based hybrid source used for pulsed load applications. *Proc. 37<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 2002, pp. 1–6.
11. Grekova A., Gordeeva L., Aristov Y. Composite sorbents «Li/Ca halogenides inside Multi-wall Carbon Nano-tubes» for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, vol. 155, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.solmat.2016.06.006
12. Shekhmeister E.I., Vasserman R.N., Maizel L.S. *Techno-Chemical Actions in Electron-Vacuum Manufacturing*. Tutorial. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1967, 352 p. (in Russian)
13. Pitukhin E.A., Ustinov A.S. Fire-resistance properties research of “water glass - graphite microparticles” composite material. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 277–283. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-277-283
14. Ustinov A.S., Pitukhin E.A. Research of “water glass — graphite microparticles” composite material by thermogravimetry method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 826–833. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833
15. Gostev V.A., Pituhin E.A., Ustinov A.S., Yakovleva D.A. Thermal insulation properties research of the composite material water glass-graphite microparticles. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 3(91). pp. 81–87. (in Russian)
16. Ustinov A.S., Rogozin S.S., Pitukhin E.A. Development and implementation of a mathematical model of the thermal effect on enclosing structures covered with fire-retardant composite material. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 3(39), pp. 41–48. (in Russian). doi: 10.18324/2077-5415-2018-3-41-48
17. Ustinov A.S. Application method of fire-retardant composite material “water glass-graphite microparticles” on enclosure surface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1001–1007. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007
18. Nemtcov M.V., Nemtcov M.L. *Electrical Engineering and Electronics*. Tutorial. Moscow, Akademija Publ., 2007, 432 p. (in Russian)
19. Krohns S., Lunkenheimer P., Kant Ch., Pronin A.V., Brom H.B., Nugroho A.A., Diantoro M., Loidl A. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 12, pp. 122903. doi: 10.1063/1.3105993

#### Авторы

**Устинов Антон Сергеевич** — старший преподаватель, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, Scopus ID: 57190126912, ORCID ID: 0000-0002-5254-0549, anton-ustinov@psu.karelia.ru

**Питухин Евгений Александрович** — доктор технических наук, профессор, профессор, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, Scopus ID: 6504519166, ORCID ID: 0000-0002-7021-2995, Eugene@petsru.ru

#### Authors

**Anton S. Ustinov** — Senior Lecturer, Petrozavodsk State University, (PetrSU), Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, Scopus ID: 57190126912, ORCID ID: 0000-0002-5254-0549, anton-ustinov@psu.karelia.ru

**Eugene A. Pitukhin** — D.Sc., Full Professor, Petrozavodsk State University, (PetrSU), Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, Scopus ID: 6504519166, ORCID ID: 0000-0002-7021-2995, Eugene@petsru.ru