УДК 621.3 Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

Для цитирования: Трифанов И. В., Суханова О. А., Мелкозеров М. Г., Жирнова Е. А., Трифанов В. И. Рекуперация энергии положительно заряженных ионов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 716–727. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

For citation: Trifanov I. V., Sukhanova O. A., Melkozerov M. G., Zhirnova E. A., Trifanov V. I. [Energy recuperation of positively charged ions]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 716–727 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ИОНОВ

И. В. Трифанов, О. А. Суханова, М. Г. Мелкозеров, Е. А. Жирнова, В. И. Трифанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 E-mail: sibgau-uks@mail.ru

Актуальным является рекуперация энергии пучков положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их заряда, например за срезом сопла электрического ракетного двигателя, в электрическую мощность.

Одним из методов решения указанной проблемы является разработка и применение рекуператоров энергии положительно заряженных ионов потока плазмы, которые могут устанавливаться вблизи среза сопла ЭРД. Процесс рекуперации энергии положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их заряда заключается в электростатическом торможении концентрированного пучка заряженных частиц и взаимодействии их с многоколлекторными электродами рекуператора энергии, которые в свою очередь являются заряжающими электродами суперконденсатора. При этом на электродах суперконденсатора накапливается электростатическое электричество, которое может быть использовано для электропитания систем космического аппарата. При взаимодействии положительно заряженных ионов с многоколлекторными электродами происходит также нейтрализация их заряда за счет воздействия на них тока электронов, поступающих со стороны двойного слоя заряжающего электрода суперконденсатора. Для повышения эффективности рекуперации энергии положительно заряженных ионов на объемный заряд заряженных частиц оказывают воздействие низкочастотным электродае и ок стороны изолированного управляющего электрода, установленного в полости многоколлекторного электрода навстречу движущемуся потоку ионов.

Разработка рекуператоров энергии положительно заряженных ионов и повышение энергетической эффективности ЭРД требует проведения научных исследований на основе построения моделей, принципов построения и оценки методов изготовления их индивидуальных компонентов.

Ключевые слова: положительно заряженные ионы, энергетическая эффективность, многоколлекторный электрод, двойной электрический слой, рекуператор энергии, управляющий электрод, твердый электролит.

ENERGY RECUPERATION OF POSITIVELY CHARGED IONS

I. V. Trifanov, O. A. Sukhanova, M. G. Melkozerov, E. A. Zhirnova, V. I. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation E-mail: sibgau-uks@mail.ru

It is important to recuperate the energy of beams of positively charged ions with simultaneous neutralization of their charge, for example, behind the nozzle of an electric rocket engine, into electric power.

One of the methods to solve this problem is development and application of energy recuperators of positively charged plasma flow ions, which can be installed near the cutoff of the ERD nozzle. The process of energy recuperation of positively charged ions with simultaneous neutralization of their charge consists in electrostatic inhibition of the concentrated beam of charged particles and their interaction with the energy recuperator multicollector electrodes, which in turn are the charging electrodes of the supercapacitor. It accumulates electrostatic electricity on the electrodes of the supercapacitor, which can be used to power the systems of the spacecraft (SC). When positively charged ions interact with multi-collector electrodes, their charge is also neutralized by the action of the electron current coming from the double layer of the charging electrode of the supercapacitor. To improve the efficiency of energy recovery of positively charged ions, the volume charge of charged particles is exposed to a low-frequency electric field by an isolated control electrode installed in the cavity of a multi-collector electrode towards the moving ion flow.

Development of energy recuperators of positively charged ions and increase of energy efficiency of ERD requires a scientific research based on the construction of models, principles of construction and evaluation of methods of manufacturing of their individual components.

Keywords: positively charged ions, energy efficiency, multi-collector electrode, double electric layer, energy recuperator, control electrode, solid electrolyte.

Введение. Для повышения энергетической эффективности электрических ракетных двигателей (ЭРД), а также нейтрализации электрического заряда ионизированных продуктов сгорания топлива за срезом сопла требуется разработка рекуператоров энергии ионов. Известно, что заряженные частицы за срезом сопла отрицательно влияют на работу ЭРД и энергетические системы космического аппарата (КА) за счет образования электростатического заряда [1; 2].

В настоящее время для нейтрализации заряда заряженных частиц продуктов сгорания топлива близко к срезу сопла устанавливают нейтрализаторы заряженных частиц, которые излучают пучки электронов, компенсирующие заряд ионов. Однако такие системы требуют дополнительной энергии для создания электронов, являются энергозатратными и повышают габаритно-массовые характеристики КА, уменьшая полезную нагрузку. В настоящее время остро стоит проблема разработки и создания многофункциональных ЭРД, работающих, например, в плазменнодетонационном или электродинамическом режимах в зависимости от полетной программы. Такой подход к построению многофункциональных ЭРД позволит увеличить удельную тягу в 1,2-1,5 раза, а также обеспечить высокий удельный импульс.

При разработке многофункциональных электрических ракетных двигателей необходимо решить вопросы повышения энергетической эффективности сжигания топлива с образованием плазмы путем разделения и использования [1] энергии заряженных компонентов: пучков электронов и ионов. Для этого требуется разработка рекуператоров энергии заряженных частиц, работающих совместно с суперконденсаторами, используемыми в качестве накопителей электростатической электрической мощности. Преобразование энергии заряженных частиц в электрическую мощность в рекуператоре энергии положительно заряженных ионов должно происходить за счет электростатического торможения пучков ионов при столкновении их с многоколлекторными электродами, а также при взаимодействии с электронами, поступающими из двойного слоя суперконденсатора и заряжающих электродов, изготовленных из нанокомпозиционных углеродных материалов, в рабочую зону рекуператора. Разработка рекуператоров энергии заряженных частиц может также позволить использовать энергию околопланетной плазмы для зарядки аккумуляторов КА. Использование энергии ионизированных продуктов сгорания топлива и энергии околопланетной плазмы для зарядки аккумуляторов КА даст возможность повысить энергетическую эффективность космических летательных аппаратов и работы ЭРД. В связи с изложенным, вопросы разработки рекуператора энергии положительно заряженных ионов являются актуальными.

Теоретическая часть. Задачей исследования является решение энергетической проблемы путем преобразования энергии сконцентрированных пучков положительно заряженных ионов в электрическую мощность с одновременной нейтрализацией из заряда за срезом магнитного сопла при создании электрореактивной силы ЭРД. Поставленная задача может быть решена при помощи рекуператора энергии положительно заряженных ионов [3], содержащего заряжающий многоколлекторный электрод, соединенный электрически с суперконденсатором, а также изолированный управляющий электрод, выходные, электрически запираемые каналы для выхода нейтральных частиц газа.

На рис. 1. показан механизм взаимодействия положительно заряженных ионов, например ионов аргона, с электронами, излучаемыми электродамиколлекторами, а также при взаимодействии с их поверхностью при рекуперации энергии.

Процесс нейтрализации катионов аргона происходит по следующей схеме:

$$Ar^{+} + e \to Ar \tag{1}$$

Рекуперация энергии катионов в электрическую мощность осуществляется одновременно в объеме рекуператора и на многоколлекторных электродах. В объеме рекуператора процесс рекуперации происходит за счет электронной эмиссии из массива покрытия многоколлекторных электродов, выполненных из нанотрубок [3]. Эмиссия электронов в объемный заряд положительно заряженных ионов происходит за счет напряжения электрического поля [4] и термоэмиссии. Напряженность электрического поля при потенциально-ионной эмиссии может изменяться от 100 до 1000 эВ. Температура на поверхности многоколлекторного электрода может находиться в пределах 300-350 °C, что достаточно для развития термоэлектронной эмиссии. Многослойные электродные структуры, выполненные из графеновых нанотрубок, обладают большой подвижностью электронов и малой энергией их выхода 4,5 эВ при взаимодействии с положительно заряженными частицами в потоке и при высаживании их на электродах-коллекторах при неупругом столкновении, когда энергия столкновения меньше энергии E_0 связи атома с поверхностью. Величина электронного торможения пропорциональна скорости иона или квадратному корню его энергии. Для торможения ионов на управляющий электрод 7 может подаваться напряжение U = 100-850 В с частотой f = 10-500 Гц в зависимости от энергии и вида положительно заряженных ионов. Воздействие ионов на торцевой заряжающий электрод ограничено энергией 70-1000 эВ, так как при такой энергии существенного выбивания атомов углерода из графита не наблюдается.



Рис. 1. Принципиальная схема рекуперации энергии ионов аргона и их нейтрализации: *1* – заряженные ионы аргона; *2* – трубчатый многоколлекторный электрод, выполненный из наномодифицированного углеродного материала; *3* – ионисторный конденсатор кольцевого типа; *4* – наномодифицированный электролит; *5* – кольцевой сепаратор, выполненный из полиамида; *6* – отрицательный электрод ионисторного конденсатора; *7* – управляющий электрод, выполненный из графита; *8* – электроды-коллекторы; *9* – торцевой электрод с ионисторным конденсатором; *10* – выходные каналы для газа

Fig. 1. Schematic diagram of argon ion energy recovery and neutralization: *I* – charged argon ions; 2 – tubular multi-collector electrode made of nano-modified carbon material; *3* – ionistor capacitor of ring type; 4 – nanomodified electrolyte; 5 – ring separator made of polyamide; *6* – negative electrode of ionic condenser; 7 – control electrode, made of graphite; 8 – electrodes-collectors; *9* – end electrode with ionistor capacitor; *10* – output channels for gas

Наиболее приемлемой энергией взаимодействия ионов с поверхностью электродов является E = 200 эВ. Электронный поток со стороны электродов рекуператора образуется за счет эмиссионных характеристик нанотрубок и переноса электронов из двойного слоя ионисторных конденсаторов. Напряженность электрического поля в точке, из которой происходит эмиссия электронов, может быть разная по поверхности многоколлекторного электрода, но она должна быть выше работы выхода электрона не меньше чем в 2 раза. Поскольку максимальная плотность тока для УНТ ограничена 106-109 А/см², то площадь заряжающих электродов ионисторного конденсатора может быть определена расчетом, а энергия пульсирующего заряда в полости рекуператора и энергия проводящего уровня нанотрубок согласованы на основе энергетического баланса работы рекуператора. Для управления процессом рекуперации может использоваться программируемый логический контроллер ПЛК-150. При рекуперации ионов аргона образуется нейтральный газ аргон, который удаляется из полости рекуператора через выходные каналы для газа 10. Процесс преобразования энергии положительно заряженных ионов в электрическую мощность происходит при определенных условиях.

При взаимодействии положительно заряженных частиц с алмазной поверхностью в преобразователе, установленном на входе в рекуператор, и с электродами-коллекторами рекуператора их энергия должна быть в 2 раза больше энергии выхода электрона из вещества графеновых нанотрубок электродовколлекторов и алмазоподобного покрытия преобразователя потока для того, чтобы происходила компенсация пространственного заряда в потоке [5–7]:

$$e \cdot U_i \ge 2 \cdot W_0 , \qquad (2)$$

где W_0 – работа выхода; U_i – потенциал ионизации.

Важным параметром ионного пучка, характеризующим влияние объемного заряда в полости электрода-коллектора на его свойства, является первеанс, который рассчитывается по формуле

$$P = \frac{I}{U^{3/2}},$$
 (3)

где *I* – ток пучка; *U* – ускоряющая разность потенциалов.

Качество пучка оценивается проекцией фазового объема V_{ϕ} на плоскость:

$$V_{\phi} = 2R_0 \sqrt{\frac{2T_i}{mc^2}}, \qquad (4)$$

где R_0 – радиус пучка плазмы, служащей источником ионов с температурой T_i ; m – масса иона; c – скорость света.

При понижении продольной энергии пучка ионов при электростатическом торможении в рекуператоре энергии возрастает вклад перпендикулярной составляющей к продольной скорости движения заряженной частицы [8; 9]. В результате угол наклона траектории к первоначальному направлению движения частицы возрастает тем больше, чем выше степень торможения пучка. Степень торможения можно обеспечить до 0,95 без потери значительной доли пучка, т. е. можно использовать начальную энергию 100 эВ и затратить до 5 эВ.

Коэффициент полезного действия рекуператора энергии ионов в электростатическое электричество можно рассчитать по формуле

$$\eta_p = \frac{e\varphi_k}{W_0} \le \frac{W_0 - W}{W_0} \,, \tag{5}$$

где W_0 – начальная энергия ионов в пучке (работа выхода); W – разброс ионов в пучке по энергиям.

На многоколлекторных электродах образуется тормозящая разность потенциалов, тогда КПД можно оценить по формуле

$$\eta_p = 1 - \frac{W_X}{W_0} \sin^2 \alpha , \qquad (6)$$

где α – угол скоса коллектора; W_X – энергия ионов при взаимодействии с электродом.

Прикладной интерес для изготовления рекуператора энергии представляют эмиссионные характеристики нанотрубок. Известно, что с площади 1 мм² при напряжении U = 500 В может быть получен ток эмиссии 0,5 МА. Эти данные находятся в хорошем соответствии с известным выражением Фаулера– Нордхейма:

$$I = c \cdot E^2 \exp\left(-k \frac{\varphi^{3/2}}{E^*}\right),\tag{7}$$

где с и k – постоянные; φ – работа выхода электрона; E^* – напряженность электрического поля в точке, где происходит эмиссия электронов [7].

Нанотрубки также могут себя проявлять как источники интенсивной термоэлектронной эмиссии при относительно низких температурах. Например, вклад термоэлектронной эмиссии становится заметным при температуре поверхности электродов 473 К и преобладает при T = 723 К. Электронная эмиссия массива нанотрубок зависит также от среднего расстояния между ними t_0 , максимум наблюдается при $t_0 = 0.5$ мкм. Фактором, ограничивающим электронную эмиссию, является температурная неустойчивость углеродных нанотрубок (УНТ). В связи с изложенным, температура должна быть $T \le 850$ ⁰C на многоколлекторных электродах, а с учетом работоспособности литиевого наномодифицированного электролита в ионисторном суперконденсаторе $T \le 150-200$ ⁰C. Температурный режим в рекуператоре обеспечивается путем прокачки охлаждающей жидкости через специальные каналы, выполненные в диэлектрическом корпусе. При работе рекуператора на электродах-коллекторах необходимо создать требуемый электронный спектр с минимальными потерями их энергии при движении электронов от двойного электрического слоя заряжающего электрода ионисторного конденсатора к наружному слою, взаимодействующему с пульсирующим объемным зарядом положительно заряженных ионов в полости коллектора. Включение внешнего электрического поля при подаче на управляющий электрод (-) или (+) смещает электронный уровень нанотрубок и повышает энергию взаимодействия положительно заряженных ионов и электронов на электродах коллектора и в его объеме электрического заряда в полости многоколлекторного электрода.

Рабочие параметры рекуператоров энергии положительно заряженных ионов во многом зависят от свойств электрохимических суперконденсаторов ионисторного типа, которые могут использоваться в качестве преобразователей и накопителей электроэнергии. Свойства конденсаторов ионисторного типа [10–14], в которых электрическое поле сосредоточенно не в поляризованном диэлектрике, как у традиционных конденсаторов, а в двойном электрическом слое на границе «электролита и материалов электрода [15–18].

В энергонакопительной системе конденсаторов рекуператора энергии положительно заряженных ионов возможно использование жидких или твердых электролитов. Конденсаторы с двойным электрическим слоем на основе твердого электролита RbAg₄I₅ разрабатывают и применяют в настоящее время.

Конкурентоспособность ионисторных суперконденсаторов с твердым электролитом RbAg₄I₅, несмотря на низкое рабочее напряжение и высокую цену, определяется совокупностью следующих параметров:

– широким интервалом рабочих температур: от -60 до +125 °C;

 высокой стойкостью к воздействиям механических факторов, в том числе к ударным нагрузкам с ускорением до 50 000 g;

 высокой стойкостью к воздействиям ионизирующих излучений, т. е. ионисторы сохраняют заряд во время и после воздействия этих факторов;

– низкими токами саморазрядки (~10⁻⁹A).

Также может применяться твердый электролит на основе лития, диапазон рабочих температур которого составляет от -70 до 150 °С.

Наименование параметров	Состав электролита	
	$RbAq_4I_5$ (на основе рубидия)	LiCLO ₄ (на основе лития)
Интервал рабочих температур	−60−125 °C	−70−150 °C
Стойкость к ударным нагрузкам	50000 g	45000g
Ток самозарядный	~10 ⁻⁹ A	~10 ⁻⁹ A
Ионная проводимость	0,01 Ом/см	0,001 – 0,0001 Ом/см
Высокая стойкость к ионизированному излучению	Да	Да
Диапазон напряжений	1,1–5,6 B	1,1–4,6 B
Максимальный ток	220 Ma/см ²	200 Ma/см ²

Свойства электролитов суперконденсатора

Основные свойства перспективных электролитов суперконденсатора показаны в таблице.

Твердые электролиты - это твердые фазы (кристаллические или стеклообразные), в которых электрический ток проводят ионы. Ионная проводимость твердых электролитов обусловлена значительной разупорядоченностью одной из подрешеток кристалла, что может быть вызвано фазовым переходом, дефектами кристаллической решетки или введением в материал специфических примесей [18-20]. Для твердых электролитов существует критическая температура, при которой происходит скачкообразное изменение ионной проводимости в несколько раз или даже на несколько порядков. Перспективными являются твердые электролиты в так называемом суперионном состоянии (СИС), т. е. в состоянии, в котором ионная проводимость превышает 0,01 Ом/см, и особенно суперионные проводники, для которых СИС реализуется при комнатной температуре.

Это дает возможность твердые электролиты использовать для создания новых индивидуальных компонентов рекуператора энергии, ионов и электронов, а также источников тока и конденсаторов с высокой удельной энергией. Суперионный проводник $RbAg_4I_5$ имеет удельную электропроводность намного порядков выше, чем изученные до его открытия соединения. Суперионный проводник $RbAg_4I_5$ относительно более устойчив к действиям света и влаги, что позволяет успешно его применять в производстве твердотельных ионисторов для создания рекуператоров энергии заряженных частиц, позволяющих преобразовать их энергию в электростатическое электричество.

Для изготовления электродов ионисторных конденсаторов (ИК), используемых в качестве накопителей энергии, могут использоваться три вида материалов: на основе углерода, оксида металлов и проводящих полимерных соединений.

Углерод и его различные полиморфные модификации наиболее широко используются в качестве материалов для изготовления электродов ионисторных конденсаторов, так как углеродный материал обладает высокой электропроводностью, развитой удельной поверхностью (до 3000 м²/г), хорошей коррозионной стойкостью, высокой температурной стабильностью, технологичностью и совместимостью в композитных материалах, относительно низкой стоимостью. Углеродный материал может применяться в различных модификациях, включая порошки активированного угля, углеволоконную ткань, аэрогели, нанотрубки, графен [16–20].

Удельная поверхность углеродного материала оказывает большое влияние на электроемкость, структуру материала, распределение пор по размерам, природу поверхностных функциональных групп и электропроводность, а также другие параметры, которые определяют производительность ионисторного конденсатора. В настоящее время исследования направлены на разработку технологий получения углеродных материалов с требуемой структурой пор, распределением их по размерам, обеспечивающим создание электродов с высокой электроемкостью и низким сопротивлением, и обеспечивающих герметичность полости конденсатора. Варьируя углеродным сырьем, условиями активации (температурой, составом атмосферы и временем), можно обеспечить требуемую пористость и распределение по размерам при изготовлении электродов, например из древесных углей [21; 22].

К высокопористым углеродным материалам относятся углеродные аэрогели, полученные пиролизом органических аэрогелей. Их получают поликонденсацией резорцина и формальдегида в золь-гельпроцессе, позволяющем контролировать плотность, размер пор и форму частиц. Матрица твердого аэрогеля состоит из соединенных между собой частиц коллоидного углерода или полимерных цепей [23].

После пиролиза материал на основе аэрогелей имеет более высокую электропроводность, чем у активированных углеродов. Углеродные аэорогели могут быть выполнены в форме монолитов, композитов, тонких пленок, порошков или микросфер, что позволяет при вариативности процесса изготавливать электроды из порошков или других компонентов аэрогелей, используя связующие, а также делать монолитный электрод.

Углеродные волокна могут быть получены из термореактивных органических материалов (целлюлозы, фенольной смолы, полиакрилонитрила и пековых материалов).

Для создания электродов ионисторного конденсатора необходимо применять материалы с высокой удельной емкостью. На рис. 2 представлены некоторые перспективные материалы. Эффективность работы рекуператора энергии положительно заряженных ионов во многом определяется построением его структурной схемы.

На рис. 3. показана структурная схема рекуператора энергии катионов. Она включает в себя заряжающий многоколлекторный электрод *1*, наномодифицированный твердый электролит *2*, сепаратор *3*, выполненный из диэлектрического материала, электростатический электрод. Заряжающий многоколлекторный электрод *1* и электростатический электрод *4* выполнены многослойными, гибридными, из наномодифицированных материалов (типа слой модифицированных MnO_2 углеродных нанотрубок + электропроводящий полимер + углеродные наномодифицированные нанотрубки и нанопористый углеродный материал), что обеспечивает высокие емкость и электропроводность электродов и хорошие эмиссионные свойства индивидуальных компонентов рекуператора энергии. Электролит изготовлен из наномодифицированного материала на основе рубидия (RbAg₄ i₅), позволяющего работать при температуре от -60 до +125 ^oC.



Рис. 2. Зависимость удельной емкости электрода суперконденсатора от применяемого материала

Fig. 2. Dependence of the specific capacity of the supercapacitor electrode on the material used



Рис. 3. Структурная схема рекуператора энергии положительно заряженных ионов

Fig. 3. Structural diagram heat exchanger energy positive ions

Процесс зарядки/разрядки в ионисторных конденсаторах происходит в слое ионов, сформированном на поверхностях положительного и отрицательного многослойно гибридных электродах, к примеру, на основе активированного угля / электропроводящего полимера / углеродных нанотрубок. Под действием приложенного напряжения анионы и катионы движутся к соответствующему электроду и накапливаются на его поверхности, образуя, таким образом, с зарядом электрода двойной электрический слой [11]. Вследствие этого и появилось название «конденсатор с двойным электрическим слоем» [12]. При приложении постоянного внешнего напряжения двойной электрический слой работает как изолирующий и не позволяет протекать сквозному току. Обычный диапазон напряжения работы ионисторов - от 2,3 до 5 В [13; 14]. Толщина двойного электрического слоя мала и сопоставима с размером молекулы, т. е. около 5-10 нм [15-17].

Электролит проникает между частицами активированного угля, и электрод таким образом «пропитан» электролитом.

Общую емкость ионисторного конденсатора можно представить как

$$C = \frac{S}{d} , \qquad (8)$$

где *d* – толщина двойного электрического слоя, 5–10 нм; *S* – общая площадь.

При зарядке ионами аргона заряжающего электрода рекуператора зарядный ток *i* можно описать по формуле

$$i = \frac{U_a}{R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR}\right),\tag{9}$$

где U_a – напряжение на заряжающем электроде; C – емкость конденсатора; R – сопротивление в конденсаторе; t – время зарядки конденсатора.

Емкость ионисторного конденсатора может быть оценена следующим образом:

$$C = \frac{I \cdot t}{U_1 - U_2},\tag{10}$$

где: C – электростатическая емкость, Φ ; I – тестовый ток, A; $U_1 – U_2$ – тестовый диапазон напряжений, B; t – время, c.

Емкость зависит от тока разряда, чтобы уменьшить погрешность измерений, необходимо использовать стандартный ток разряда 1 мА/Ф.

Внутреннее сопротивление ионисторного конденсатора по сравнению с электролитическим велико, так как эквивалентная схема ионистора состоит из соединений большого количества малых конденсаторов, имеющих различные значения внутреннего сопротивления, поэтому ток зарядки может достигать до 10 мкА.

Характеристика заряда ионистора при условии некоторых допущений может быть представлена выражением

$$U = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \right).$$
(11)

Время разряда для постоянного тока и постоянного сопротивления нагрузки при разряде приведены в выражениях (12) и (13) соответственно:

$$t = \frac{C(U_0 - U_1)}{I},$$
 (12)

$$t = -CR \ln\left(\frac{U_1}{U_0}\right),\tag{13}$$

где t – время; C – емкость; U_0 – внутреннее напряжение; U_1 – напряжение после t(c); I – ток нагрузки; R – сопротивление нагрузки.

Характеристика разряда ионистора по времени может быть представлена следующим образом:

$$t = \frac{C(U_1 - U_2)}{I}.$$
 (14)

Характеристика саморазряда ионистора может быть представлена следующим образом:

$$U = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR_1}\right),\tag{15}$$

где *R*₁ – сопротивление изоляции (сумма сопротивления частиц гибридного электрода).

Предполагаемый срок эксплуатации может быть рассчитан по формуле

$$t_{9} = \frac{CU}{i} = \frac{C(U_{0} - iR - U_{1})}{I + i_{2}},$$
 (16)

где C – емкость ионистора, Φ ; i – ток в течение эксплуатации; i_2 – ток утечки, A; R – внутреннее сопротивление ионистора, Ом на 1 кГц; U_1 – напряжение, на которое разрядился ионистор, B; U_0 – приложенное напряжение, B.

На рис. 4 показана схема контроля параметров и управления процессом работы рекуператора положительно заряженных ионов, совмещенная с процессом зарядки аккумулятора.

Рекуператор (рис. 4) работает следующим образом [3]: положительно заряженные частицы продуктов сгорания топлива под действием отрицательно электрического потенциала 1-1,5 кВ, подаваемого на кольцевой изолированный электрод 3, установленный на входе диффузора 1, направляются в конический канал 2 экспандера, где разгоняются дополнительно при помощи ускоряющего потенциала 1 кВ, поданного на кольцевой изолированный электрод 5 для формирования униполярного пучка положительно заряженных ионов. При движении пучка по коническому каналу 2 он уплотняется, некоторые ионы с большой энергией при этом могут взаимодействовать с электронами, выходящими с поверхности алмазоподобной пленки 9, сформированной на кремниевой решетке 10, нанесенной толщиной 0,2-0,4 мкм на внутреннюю поверхность канала. При движении пучка ионов по каналу на него может осуществляться воздействие со стороны изолированного ускоряющее-тормозящего электрода 7 для выравнивания и управления энергией потока.

Диффузор 1, конический канал 2, установленные на них кольцевые электроды 3, 5, 7 на изоляторах 4, 6, 8 в совокупности образуют преобразователь потока заряженных частиц, который обеспечивает подачу в рекуператор пучка положительно заряженных ионов с соответствующей их массой, составом и энергией.



Рис. 4. Схема контроля параметров и управления процессами работы рекуператора положительно заряженных ионов продуктов сгорания топлива:

1 – диффузор; 2 – конический канал, 3, 5, 7 – кольцевые изолированные электроды; 4, 6, 8 – изоляторы; 9 – алмазоподобная пленка; 10 – кремниевая решетка; 11 – входной канал отражателя; 12 – устройство круговой развертки; 13 – диэлектрический корпус рекуператора; 14, 15, 21 – положительно заряженные многоколлекторные электроды; 16, 19, 22 – отрицательно заряженные многоколлекторные электроды; 17 – кольцевой сепаратор; 18 – кольцевой изолятор конденсаторов; 20 – твердый наномодифицированный электролит; 23 – управляющий электрод; 24 – изолятор; 25 – конический наконечник; 26 – изолятор;
 27 – канал для прокачки охлаждающей жидкости; 28 – канал для выхода газа; 29 – отрицательно заряженные кольцевые электроды; 30 – углеродные нанотрубки; 31–33 – отрицательно заряженные электроды; 34–36 – положительно заряженные электроды; 37 – датчик контроля объемного заряда; 38 – патрубок; 39 – насос для подачи охлаждающей жидкости; 40 – вольтметр; 41 – амперметр; 42 – аккумуляторная батарея; 43 – источник высокого напряжения (ИВН); 44 – блок управления ИВН; 45 – низкочастотный источник тока (НИТ); 46 – блок управления НИТ; 47 – частотомер

Fig. 4. Control scheme of parameters and processes control of the recuperator of positively charged ions of fuel combustion products:

1 - diffuser; 2 - conical channel; 3, 5, 7 - annular insulated electrodes; 4, 6, 8 - insulators; 9 - diamond-like film; 10 - silicon grid;
11 - reflector input channel; 12 - circular scanner; 13 - dielectric case of the heat exchanger; 14, 15, 21 - positively charged multi-collector electrodes; 16, 19, 22 - negatively charged multi-collector electrodes; 18 - ring insulator of capacitors; 20 - solid nanomodified electrolyte;
23 - control electrode; 24 - insulator; 25 - conical tip; 26 - insulator; 27 - coolant flow channel; 28 - gas outlet channel; 29 - negatively charged ring electrodes; 30 - carbon nanotubes; 31-33 - negatively charged electrodes; 34-36 - positively charged electrodes;
37 - sensor monitoring space charge; 38 - pipe; 39 - pump for coolant; 40 - voltmeter; 41 - ammeter; 42 - battery; 43 - high voltage source (IVN); 44 - IVN control unit; 45 - low frequency current source (NIT); 46 - BAT control unit; 47 - frequency meter

Затем униполярный пучок положительно заряженных ионов через входной канал отражателя 11, выполненный из графита, поступает в рекуператор, установленный в диэлектрический корпус 13, проходит через устройство круговой развертки 12, при этом поток рассеивается, энергия их может быть от 60 до 1000 эВ, которая подбирается для каждого вида ионов или совокупности ионов. Положительно заряженные ионы взаимодействуют с первым многоколлекторным заряжающим электродом 14 первого бокового ионисторного конденсатора, установленного на кольцевом изоляторе 18, образованного двумя кольцевыми полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17, заполненными твердым наномодифицированным электролитом 20. Взаимодействие рассеянных положительно заряженных ионов, обладающих меньшей энергией, с заряжающим многоколлекторным электродом 14 происходит в результате неупругого столкновения, в основном за счет электростатического и электронного механизма торможениях, который связан с электронами коллекторов 14, покрытых многослойным покрытием из углеродных нанотрубок 30, модифицированных железом. Ионы со средней энергией проходят в полость второго рекуператора энергии и взаимодействуют со вторым многоколлекторным заряжающим электродом 15 тоже на основе электростатического и электронного механизма торможения. Поверхности второго многоколлекторного электрода также покрыты многослойным покрытием из углеродных наномодифицированных трубок 30, а сам многоколлекторный электрод связан со вторым боковым конденсатором ионисторного типа, образованным кольцевым электростатическим электродом 19 с полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17, заполненными твердым наномодифицированным электролитом на литиевой основе. Величина электронного торможения пропорциональна скорости иона или квадратному корню его энергии. Энергия иона в рекуператоре также может тратиться за счет его столкновения с атомами газа, образующегося за счет регенерации ионизированного вещества и его взаимодействия с электродами-коллекторами [3].

Для выхода молекул газа из полости рекуператора в его корпусе выполнены каналы 28 с установленными на них изолированными отрицательно заряженными кольцевыми электродами 29, на которые подается потенциал 1-1,5 кВ для торможения положительно заряженных ионов. Положительно заряженные ионы с высокой энергией поступают на заряжающий электрод-коллектор 21 торцевого ионисторного конденсатора, обладающего более высокой емкостью, чем боковые конденсаторы, и меньшим внутренним сопротивлением, образованного электростатическим электродом 22 и полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17 и заполненными твердым наномодифицированным электролитом 20. По центру торцевого конденсатора установлен управляющий изолированный электрод 23 на изоляторе 24 с коническим наконечником 25, выполненным из графита и установленном на изоляторе 26. На управляющий электрод 23 может подаваться потенциал от 100 до 850 В с частотой 10–500 Гц в зависимости от энергии и вида положительно заряженных ионов. Воздействие положительно заряженных ионов на торцевой электродколлектор 21 может быть более сильным, поэтому по толщине он превосходит многоколлекторные электроды 14 и 15 в 4 и более раза.

Известно, что бомбардировка ионами носит импульсный нетермический характер, и в связи с тем, что $E_{\text{пор}} = 23$ эВ при T = 200 °C, торцевой электродколлектор 21 ионисторного конденсатора более интенсивно охлаждается, чем два боковых ионисторных конденсатора с многоколлекторными электродами 14 и 15 путем прокачки охлаждающей жидкости через каналы 27, выполненные в диэлектрическом корпусе. Воздействие ионов на торцевой заряжающий электрод ограничено энергией положительно заряженных частиц 70-1000 эВ, так как, как уже говорилось, при такой энергии существенного выбивания атомов электрода из графита не наблюдается. Все многоколлекторные электроды рекуператора устанавливались таким образом, чтобы угол падения положительно заряженных ионов на них был более 60°, для увеличения отражения от них ионов, которые в случае застревания их в поверхности электродов 14, 15 и 21 могут существенно изменить их электронный спектр. Для обеспечения электронного спектра электродов рекуператора их многослойные покрытия изготавливались из нанотрубок большого диаметра (1–1,5 нм и более), трубки использовались наномодифицированные, со средним расстоянием между ними 0,5 мкм, связями, обеспечивающими сопротивляемость УНТ бомбардировке заряженными частицами за счет параметров ориентации связей, снижающих их деформацию при взаимодействии с ионами.

Бомбардировка графитового наконечника 25 и выбивание из него электронов и ионов углерода может способствовать зашиванию дефектов УНТ при выбивании из них атомов, кроме того, графит способен выдерживать высокие температуры при эксплуатации (до 3000 °C). Часть положительно заряженных ионов при взаимодействии с электродами рекуператора заряжает их положительно, а сами ионы вещества при этом подвергались регенерации с образованием атомов вещества. Отраженная часть положительно заряженных частиц задерживается в рекуператоре за счет работы устройства круговой развертки 12.

Электронный поток со стороны электродов рекуператора образовывается за счет эмиссионных характеристик нанотрубок и переноса электронов из двойного слоя заряжающего электрода ионисторного конденсатора. Напряженность электрического поля в точке, из которой происходит эмиссия электронов, может быть разная по поверхности многоколлекторного электрода, но она должна быть выше работы выхода электрона. При воздействии переменного электрического поля со стороны управляющего электрода 23 происходит активация энергии взаимодействия положительно заряженных ионов с электронами у поверхности электродов рекуператора за счет пульсации положительно заряженного объемного заряда в полости рекуператора с частотой f = 10-500 Гц и напряжением 200-500 В. Это приводит к зарядке ионисторных конденсаторов при минимальном напряжении 0,16 В с возможностью транспортировки электронов в зоны, где происходит их взаимодействие с положительно заряженными ионами. При накоплении электростатического электричества на ионисторных конденсаторах до определенной емкости и напряжения на электродах не более 3-5 В заряд с них может сниматься с использованием отрицательно заряженных электродов 31, 32, 33 и положительно заряженных электродов 34, 35, 36, и электрическая энергия направляется на зарядку аккумуляторов 42 и питания электрической системы ЭРД. Поскольку максимальная плотность тока для УНТ ограничена 106-109 А/см², то площадь заряжающих электродов ионисторных конденсаторов может быть определена расчетом, а энергия пульсирующего заряда в полости коллектора и энергия проводящего уровня нанотрубок согласованы на основе энергетического баланса работы рекуператора. Следует отметить, что рекуператоры для каждого вида положительно заряженных ионов могут иметь свои рабочие параметры и многообразные характеристики [2].

Отраженные заряженные частицы от графитового наконечника 25, управляющего электрода 23 и торцевого электрода коллектора 21 попадают на электроды многоколлекторной системы 14 и 15, где разряжаются и частично оседают на их поверхности. За счет пульсирующего переменного электрического поля со стороны управляющего изолированного электрода их энергия активируется, и они тоже разряжаются, а частицы, находящиеся в объеме, получают дополнительную энергию, позволяющую им активно участвовать в процессах рекуперации энергии и регенерации заряженных частиц. Многоколлекторные системы с широким энергетическим спектром торможения 14 и 15 рекуператора, являющиеся заряжающими электродами последовательно установленных кольцевых боковых конденсаторов ионисторного типа, а также цилиндрического заряжающего электрода-коллектора 21 торцевого кольцевого ионисторного конденсатора, обеспечивают широкую зону торможения за счет заполнения рабочих полостей суперконденсаторов наномодифицированным электролитом, например, на литиевой основе 20, различного химического состава с требуемой удельной емкостью, высоким выходным напряжением, токовой нагрузкой, электрохимическим потенциалом на положительно заряженных электродах 14, 15, 21, а также отрицательно заряженных электродах 16, 19, 22, обеспечивающих высокую плотность энергии при температурном режиме $T \le 200$ ⁰C. Для управления процессом рекуперации энергии – потенциалами на электродах рекуператора 14, 15, 21, объемным зарядом в полости рекуператора, режимом зарядки и разрядки, напряжением на электродах, температурным режимом на ионисторных конденсаторах, может использоваться контроллер ПЛК-150, соединенный с цифровыми приборами для измерения тока, напряжения, контроля объемного заряда 37, а также коммутатором. Управление режимом рекуперации и работой ионисторных конденсаторов может осуществляться комплексно при помощи контроллера путем регулирования напряжения, измеряемого вольтметром 40, на ускоряющих 3 и 5, ускоряюще-тормозящем 7 и управляющем электродах 23, на который подается напряжение от НИТ 45, управляемое блоком управления 46 и контролируемое частотомером 47, а также регулирования величины тока, напряжения при зарядке и разрядке конденсаторов ионисторного типа на потребителя электроэнергии, в том числе за счет поддержания остаточного потенциала на электродах и на электродах-коллекторах. Все параметры работы рекуператора и ионисторного конденсатора могут быть сбалансированы за счет управления процессом рекуперации контроллером ПЛК-150, а также при помощи блока управления 44 источника высокого напряжения (ИВН) 45 [24]. Ионисторные конденсаторы в системе рекуперации могут быть использованы как преобразующий элемент, накопитель электроэнергии и источник напряжения. Их зарядка и разрядка в импульсном режиме способствует интенсификации рекуперации энергии положительно заряженных ионов.

В процессе экспериментальных исследований рекуперации энергии положительно заряженных частиц [3] использовались пучки медленных положительно заряженных ионов аргона, извлекаемых из потока работающего генератора ионов в специальной вакуумной камере высоким ускоряемым потенциалом 5 кВ на кольцевом электроде 3 и ускоряемых U = 3 кВ при помощи дополнительного ускоряющего электрода 5 с последующим торможением до 800 эВ при помощи ускоряюще-тормозящего электрода 7 и торможением перед торцевым заряжающим электродомколлектором менее 200 эВ управляющим изолированным электродом-отражателем 23. При этом на электродах первого бокового конденсатора было получено напряжение U = 2,2-2,4 B, на втором боковом конденсаторе – U = 2,6-2,8 В, на торцевом конденсаторе – U = 3,5-3,8 В течение времени 15–20 минут. Контроллер ПЛК-150 (рис. 4) использовался при проведении эксперимента [3], вольтметры 40 и амперметры 41 применялись для контроля электрических параметров, а регулятор расхода охлаждающей жидкости 38 – для стабилизации температурного режима при подаче хладагента при помощи насоса 39.

Положительный эффект обусловлен тем, что при работе рекуператора положительно заряженных ионов одновременно осуществляется рекуперация их электрической энергии с регенерацией положительно заряженных частиц, что обеспечивает повышение КПД, снижение габаритно-массовых характеристик рекуператора и может способствовать эффективной работе ЭРД, улучшению его энергообеспечения, а также надежной работе космического аппарата.

Для управления процессами зарядки и разрядки конденсаторов ионисторного типа рекомендуется использовать контроллер ПЛК-150 совместно с цифровыми приборами: цифровым вольтметром SM501, цифровым амперметром SM020. Контроллер является устройством управления в электронике и вычислительной технике. Промышленный контроллер представляет собой управляющее устройство, применяемое в промышленности и других отраслях для автоматизации технологических процессов. Программируемый логический контроллер (ПЛК) относится к промышленному оптимизированному управляющему устройству для выполнения логических операций. В качестве основного режима работы ПЛК выступает его длительное автономное использование, зачастую в неблагоприятных условиях окружающей среды, без серьезного обслуживания и практически без вмешательства человека.

Заключение. В результате выполненных исследований предложена принципиальная схема рекуперации энергии пучков положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их электрического заряда. Обоснованы электрические параметры, механизм рекуперации и нейтрализации пространственного заряда пучка положительно заряженных ионов. Показана структурная схема рекуператора энергии положительно заряженных ионов, представляющая собой систему многоколлекторных и управляющего электродов, выполненных из нанокомпозиционных углеродных материалов, интегрированных с конденсатором ионисторного типа. Разработаны конструкторско-технологические решения при изготовлении индивидуальных компонентов и для контроля параметров рекуператора энергии положительно заряженных ионов.

Развитие перспективных методов преобразования энергии пучков плазмы положительно заряженных ионов в электрическую мощность будет способствовать повышению энергетической эффективности ЭРД, а также созданию новых энергетических источников электроэнергии, работающих на потоке плазмы.

Библиографические ссылки

1. Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П. Электрические ракетные двигатели. М. : Энергия, 1975. 272 с.

2. Повышение эффективности многофункциональных электрических ракетных двигателей / И. В. Трифанов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 729–737.

3. Пат. 2617689 Российская Федерация, МПК В 01 D 69/00 (2006.01). Рекуператор энергии положительно заряженных ионов / Трифанов И. В. Кузьмин Б. Н., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2016115104 ; заявл. 19.04.2016 ; опубл 26.04.2017, Бюл № 12. 8 с.

4. Воронина Е. Н. Воздействие быстрых атомов на наноструктуры и полимерные композиты : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.08 : защищ. 28.03.2012. М., 2012. 143 с.

5. Курнаев В. А., Протасов Ю. С., Цветков И. В. Введение в пучковую электронику : учеб. пособие / под ред. В. А. Курнаева. М. : МИФИ, 2008. 452 с.

6. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе : материал технической информации // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 233–275.

7. Бочаров Г. С. Эмиссионные свойства катодов на основе углеродных нанотрубок : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14. М., 2007. 96 с.

8. Пат. 1741595 Российская Федерация, МПК Н 05 Н 7/12 (1995.01). Рекуператор ионного тока / Мартынов М. И., Чекалин Г. Г. № 4845805/21 ; заявл. 31.05.1990 ; опубл. 27.08.1995. 10 с.

9. Димитров С. К., Обухов В. А. Системы торможения и рекуперации энергии плазменных потоков, (Ионные инжекторы и плазменные ускорители) / под ред. А. И. Морозова и Н. Н. Семашко. М. : Энергоатомиздат, 1989. С. 193–219.

10. Рекуперация энергии квазиуниполярных пучков электронов и ионов в электроэнергию ЭРД / Д. Р. Рыжов [и др.] // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. : в 2 ч. Красноярск, 2015. С. 171–172.

11. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals Technological Applications. New York : Kuwer-Plenum Publ. Co., 1999. 10 p.

12. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии. 2006. № 9. URL: http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12 (дата обращения: 23.05.2018).

 Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. П. Кузнецов [и др.] // Компоненты и технологии. 2005. № 6. 12 с.

14. Исследование свойств ионисторов и эффективности их применения в системах электропитания космических аппаратов / А. И. Галушко [и др.] // Вопросы электромеханики. 2013. Т. 133. С. 15–18.

15. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): новые разработки / В. П. Кузнецов [и др.] // Электрическое питание. 2006. № 2. 8 с.

16. Conway B. E. Pseudocapacitanse; its Nature and Relation to Double Layer Capacitance of Electrochemical Capacitors / University of Ottawa, Canada. 15 p.

17. Ионисторы – электрохимические твердотельные элементы / В. П. Кузнецов [и др.] // Электронная промышленность. 1975. № 8. С. 42–44.

18. Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density / C. Liu [et al.] // Nano Letters. 2010. Vol. 10. P. 53–4868.

19. Graphene-based ultracapacitor / M. D. Stoller [et al.] // Nano letters. 2008. Vol. 8, № 10. P. 3498–3502.

20. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // Electrochimica Acta. 2000. Vol. 45, № 15–16. P. 2483–2498.

21. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of power sources. 2006. Vol. 157, № 1. P. 11–17.

22. Hybrid nanostructured materials for highperformance electrochemical capacitors / G. Yu [et al.] // Nano Energy. 2013. Vol. 2. P. 213–234.

23. Писарева Т. А. Физические основы накопления энергии и электродные материалы электрохимических конденсаторов // Вестник Удмуртского университета. Физика и химия. 2014. Вып. 3. С. 30–41.

24. Филимонова Н. П. Технология автоматизированного контроля электрических параметров ионисторов : Атомный проект // Информационный журнал специалистов в области атомного машиностроения. 2016. № 23. С. 8–9.

References

1. Grishin S. D., Leskov L. V., Kozlov N. P. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 272 p.

2. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Oborina L. I., Trifanov V. I., Savel'eva M. V. [Improving the efficiency of multifunctional electric rocket engines]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 3, P. 729–737 (In Russ.).

3. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Trifanov V. I., Oborina L. I. *Rekuperator energii polozhitel'no zaryazhennykh ionov* [The heat exchanger energy positive ions]. Patent RF, no 2617689, 2017.

4. Voronina E. N. *Vozdeystvie bystrykh atomov na nanostruktury i polimernye kompozity. Kand. Diss.* [Effects of fast atoms on nanostructures and polymer composites. Cand. Diss.]. Moscow, 2012.

5. Kurnaev V. A., Protasov Yu. S., Tsvetkov I. V. *Vvedenie v puchkovuyu elektroniku* [Introduction to beam electronics]. Moscow, MEPhI Publ., 2008, 452 p.

6. Eletskiy A. V. [Mechanical properties of carbon nanostructures and materials based on them]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2007, Vol. 177, No. 3, P. 233–275 (In Russ.).

7. Bocharov G. S. *Emissionnye svoystva katodov na osnove uglerodnykh nanotrubok. Kand. Diss.* [Emission properties of cathodes based on carbon nanotubes. Cand. Diss.]. Moscow, 2007.

8. Martynov M. I., Chekalin G. G. *Rekuperator ionnogo toka* [Ion current recuperator]. Patent RF, no. 1741595, 1995.

9. Dimitrov S. K., Obukhov V. A. Sistemy tormozheniya i rekuperatsii energii plazmennykh potokov (Ionnye inzhektory i plazmennye uskoriteli) [Braking systems and recovery of plasma flows of energy (Ionic injectors and plasma accelerators)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, P. 193–219.

10. Trifanov I. V., Ryzhov D. R., Kaz'min B. N., Oborina L. I. [Energy recovery kvaziunipolyarnyh beams of electrons and ions in the ERE energy]. *Reshetnevskie chteniya*. Krasnoyarsk, 2015, P. 98–99 (In Russ.).

11. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals Technological Applications. Kuwer-Plenum Publ. Co., New York, 1999.

12. Pankrashkin A. [Supercaps Panasonic: physics, principle of operation, parameters]. *Ionistory Panasonic:*

fizika, printsip raboty, parametry. Komponenty i tekhnologii. 2006, No. 9. Available at: http://ecworld.ru/.

13. Kuznetsov V., Pan'kin O. [Capacitors with a double electric layer (supercapacitor): the development and production]. *Komponenty i tekhnologii*. 2005, No. 6, 12 p. (In Russ.).

14. Galushko A. I., Grom Yu.I., Lazarev A. N., Salikhov R. S. [Study of ionistor properties and efficiency of their application in spacecraft power supply systems]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2013, Vol. 133, P. 15–18 (In Russ.).

15. Kuznetsov V. P. [Capacitors with a double electric layer (supercapacitor): the development and production]. *Elektricheskoe pitanie*. 2006, No. 2, 8 p. (In Russ.).

16. B. E. Conway (University of Ottawa, Canada). Pseudocapacitanse; its Nature and Relation to Double Layer Capacitance of Electrochemical Capacitors.

17. Kuznetsov V. P. [Ionistors-electrochemical solidstate elements]. *Elektronnaya promyshlennost.* 1975, No. 8, P. 42–44 (In Russ.).

18. Liu C., Yu Z., Neff D., Zhamu A., Jang B. Z. Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density. *Nano Letters*. 2010, Vol. 10, P. 53–4868.

19. Stoller M. D., Park S., Zhu Y., An J., Ruoff R. S. Graphene-based ultracapacitor. *Nano letters*. 2008, Vol. 8, No. 10, P. 3498–3502.

20. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*. 2000, Vol. 45, No. 15–16, P. 2483–2498.

21. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of power sources*. 2006, Vol. 157, No. 1, P. 11–17.

22. Yu G., Xie X., Pan L., Bao Zh., Cui Y. Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors. *Nano Energy*. 2013, Vol. 2, P. 213–234.

23. Pisareva T. A. [Physical bases of energy storage and electrode materials of electrochemical capacitors]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta (Fizika i Khimiya).* 2014, Vol. 3, P. 30–41.

24. Filimonova N. P. [Technology of automated control of electrical parameters of ionistors]. *Atomnyy proekt*. 2016, No. 23, P. 8–9.

© Трифанов И. В., Суханова О. А., Мелкозеров М. Г., Жирнова Е. А., Трифанов В. И., 2018