

# РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ

**В.А.Степанов<sup>1,2</sup>, В.А.Чернов<sup>3</sup>, Ю.Г.Паршиков<sup>4</sup>, В.П.Лебедев<sup>5</sup>,  
Е.В.Харанжевский<sup>5,6</sup>**

<sup>1</sup> ОО «Лаборатория материалов ИАТЭ»

249030, Калужская область, г. Обнинск, Пяткинский проезд, д. 12

<sup>2</sup> Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1

<sup>3</sup> ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1

<sup>4</sup> ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований

в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, с. 6

<sup>5</sup> ОАО «ЭЛЕКОНД». 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3

<sup>6</sup> Удмуртский государственный университет. 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1



В источниках тока с радиоактивным изотопом (ИТРИ) прямое преобразование ядерной энергии в электрическую происходит в результате разделения электрических зарядов при распаде радиоактивных изотопов. Ранее было показано, что в качестве макетов ИТРИ можно использовать асимметричные суперконденсаторы, в которых после импульсного реакторного облучения в результате внутренней наведенной активности пострадиационное увеличение электрического заряда на обкладках достигает нескольких кулон. В данной работе разделение и накопление электрического заряда в суперконденсаторах изучалось непосредственно в процессе нейтронного облучения. Исследовались электрофизические характеристики цилиндрических суперконденсаторов с органическим электролитом производства ОАО «ЭЛЕКОНД».

Проведено сравнение симметричного и асимметричного суперконденсаторов и показано, что в асимметричном конденсаторе происходит эффективное накопление заряда, не зависящее от плотности потока нейтронов и определяемое поглощенной дозой излучения. Электрическое напряжение между обкладками симметричного суперконденсатора с емкостью 100 Ф в процессе облучения до поглощенной дозы 50 Гр достигает 1,24 мВ.

При облучении асимметричных суперконденсаторов с той же дозой значительный рост разности потенциалов до 1,15 В наблюдается в процессе облучения и в течение длительного времени после облучения ( $1,5 \cdot 10^5$  с) за счет перераспределения электрического заряда ( $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  Кл) в электролите и углеродных частицах с формированием двойного электрического слоя. Пострадиационное увеличение емкости асимметричных суперконденсаторов составляет  $\sim 5$  мФ.

**Ключевые слова:** суперконденсатор, нейтронное облучение, радиационно-индуцированный электрический заряд.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве источников энергии для малогабаритной техники, в основном, используются химические (литиевые) источники. Однако литиевые источники имеют ограничения по миниатюризации, узкий диапазон положительных и отрицательных рабочих температур, требуют периодической подзарядки, их удельная мощность не превышает 1 кВт/кг [1, 2]. Наиболее перспективными могут быть источники тока постоянной готовности, основанные на прямом преобразовании ядерной энергии в электрическую, при котором распад радиоактивных изотопов приводит к радиационно-индуцированному разделению электрических зарядов [3 – 8]. Ожидаемые характеристики источника тока такого типа [7, 8] значительно превышают литиевые и характеризуются энергетическим запасом более  $10^3$  кВтч/кг, мощностью до 25 кВт/кг и минимальным объемом  $10^{-2} - 10^{-3}$  см<sup>3</sup>. Срок эксплуатации зависит от периода полураспада используемого изотопа, например, время жизни перспективных для использования изотопов америция-241 составляет 460 лет, а углерода-14 – 5700 лет. Основными областями применения источников тока с использованием радиоактивных изотопов (ИТРИ) являются микросистемная техника и микроэлектромеханические системы, объекты в удаленных и труднодоступных местах, работающие в экстремальных условиях, системы мониторинга, связи, навигации.

В предварительных работах [3 – 7] были исследованы различные структуры МДМ (металл-диэлектрик-металл) как преобразователи ядерной энергии в электрическую. В них используется энергия быстрых частиц за счет аккумуляции энергии вторичных электронов, выходящих с поверхности слоев МДМ-структур. Были получены расчетные и экспериментальные данные по удельной энергии, току и напряжению при различных радиационных воздействиях. Показано, что значительные КПД преобразования радиационной энергии могут быть получены при наноструктурировании МДМ-систем для достижения большей площади рабочей поверхности разделения заряда. Расчеты на основе полученных экспериментальных данных показали, что для ИТРИ при мощности поглощенной дозы 1 Гр/с от распадающегося внутри изотопа токи до 100 мкА возникают при межфазных площадях  $10^3 - 10^4$  м<sup>2</sup> [7]. Такие площади реализуются в суперконденсаторах и ионисторах, где основным компонентом МДМ-структуры является наноструктурированный углеродный электрод.

Как макеты ИТРИ были исследованы асимметричные суперконденсаторы с емкостями до 22 Ф с обкладками на основе саже-графитовой смеси и  $\beta$ -глинозема и твердым неорганическим электролитом  $Ag_4RbI_5$  [7]. После импульсного реакторного облучения до доз 2 Гр (по быстрым нейтронам) в электролите ионисторов возникли активные изотопы, в основном, с I-131 и Rb-87, как источники первичных заряженных частиц с выходом до  $10^7$  част./с. Пострадиационное изменение электрического заряда на обкладках в результате внутренней наведенной активности достигало 3 Кл. При этом было показано, что гамма-облучение не влияет на процессы разделения и накопления заряда.

Для дальнейших разработок ИТРИ необходимо физическое моделирование процессов разделения электрического заряда в суперконденсаторах при введении в них радиоактивного изотопа. В данной работе такое моделирование выполнено с помощью измерений электрофизических характеристик суперконденсаторов, в которых роль радиоактивного изотопа играет проникающее непрерывное нейтронное излучение.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовались электрофизические характеристики цилиндрических суперконденсаторов с органическим электролитом производства ОАО «ЭЛЕКОНД» объемом  $12 \text{ см}^3$  с массой углеродного слоя  $3,5 \text{ г}$  (удельная поверхность  $1800 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и бумажным сепаратором. Для облучения использовался источник нейтронов, обеспечивающий мощность поглощенной дозы до  $0,1 \text{ Гр/с}$ . Мощность поглощенной дозы сопутствующего гамма-излучения не превышала  $0,03 \text{ Гр/с}$ . Измерения проводились с помощью комбинированного прибора Щ300 и мультиметра DT 9208 в герметичной емкости с предварительно отожженным силикагелем.

Измерения величин напряжения и тока симметричного суперконденсатора электрической емкостью  $100 \text{ Ф}$  в процессе и после облучения выполнялись на сопротивлении нагрузки  $10 \text{ кОм}$ . Результаты измерений напряжения  $U$  между обкладками приводятся на рис. 1.

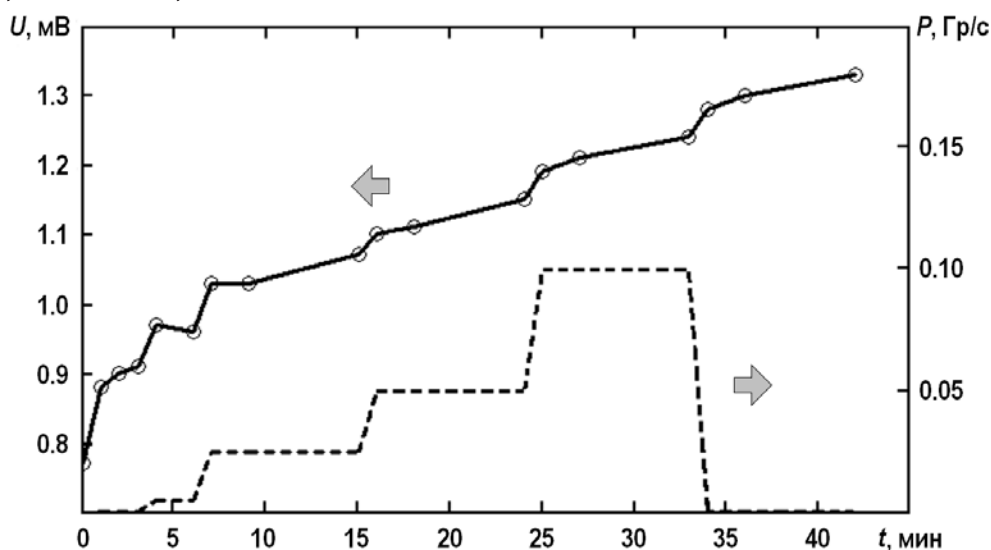


Рис. 1. Зависимости мощности поглощенной дозы от источника нейтронов  $P$  и напряжения  $U$  между обкладками симметричного суперконденсатора от времени

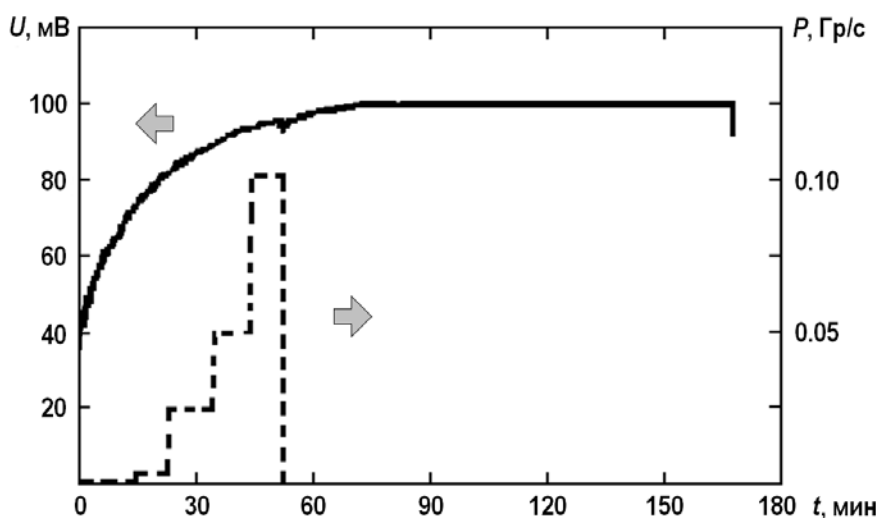


Рис. 2. Зависимости мощности поглощенной дозы от источника нейтронов  $P$  и напряжения  $U$  между обкладками асимметричного суперконденсатора от времени

В асимметричных суперконденсаторах одна из обкладок представляла собой гладкую алюминиевую фольгу. При измерении их электрофизических характеристик входное сопротивление вольтметра составляло 2 МОм. Результаты показаны на рис. 2.

Измерения электрического напряжения между обкладками асимметричного суперконденсатора выполнялись также спустя  $8 \cdot 10^4$  с после облучения. Результаты представлены на рис. 3. До измерений суперконденсатор находился в разомкнутом состоянии. Последующие измерения напряжения еще через  $8,6 \cdot 10^4$  с дали значение 1,15 В.

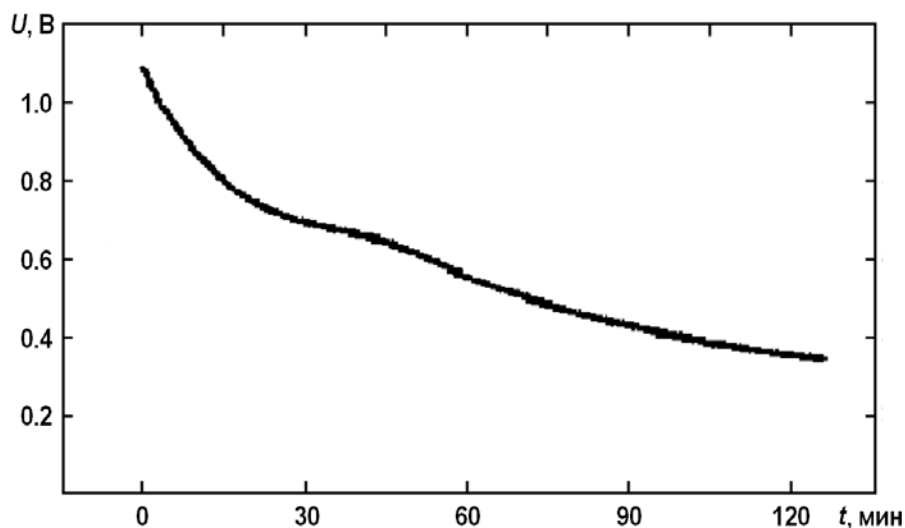


Рис. 3. Изменение электрического напряжения между обкладками асимметричного суперконденсатора через сутки после облучения. Началу измерений соответствует  $t = 0$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

На основании результатов измерений симметричных суперконденсаторов можно заключить, что электрическое напряжение между обкладками суперконденсатора не зависит от плотности потока нейтронов, а определяется дозой облучения. После прекращения облучения электрическое напряжение между обкладками суперконденсатора продолжало расти. Это означает, что разделение заряда связано с внутренними длительными (на временах  $10^2 - 10^3$  с) процессами в электролите. В суперконденсаторах двойной электрический слой с удельной площадью до  $10^3$  м<sup>2</sup>/г образуется на чрезвычайно развитой внутренней поверхности углеродного материала в результате процессов накопления ионов в сольватной оболочке из молекул раствора вблизи поверхности обкладки. Заряд этого слоя компенсируется электрическим зарядом непосредственно на поверхности обкладки.

В [8] показано, что асимметрия (по площади) обкладок обеспечивает эффективное разделение заряда между ними. В [7, 8] получена величина радиационно-индуцированной удельной поверхностной плотности электрического заряда на проводнике МДМ-структуры при нейтронном облучении или облучении тяжелыми ионами  $\rho \sim 10^{-8}$  Кл/Гр·м<sup>2</sup>. При площади обкладок до  $10^4$  м<sup>2</sup> и поглощенной дозе 50 Гр величина радиационно-наведенного электрического заряда составляет около  $5 \cdot 10^{-3}$  Кл. Кривая на рис. 2 отражает кинетику накопления заряда в процессе облучения, а также процесс формирования двойного электрического слоя за счет диффузионного перераспределения вдоль поверхности обкладки накопленного в электролите заряда. Поскольку значительный рост разности потенциалов наблюдается в течение длительного времени после облучения, когда радиационное разделение заряда уже произошло, можно полагать, что на больших временах происхо-

дит увеличение емкости асимметричного конденсатора за счет перераспределения электрического заряда в электролите и на углеродных наночастицах с формированием двойного электрического слоя. Так, измерения напряжения через сутки ( $8,6 \cdot 10^4$  с) показали его увеличение в 10 раз. Это соответствует пострadiационному увеличению емкости в 10 раз до величины  $\sim 5$  мФ. Возникновение почти на два порядка меньших напряжения и тока между обкладками симметричного суперконденсатора следует связывать с наличием некоторой асимметрии между ними.

Такая интерпретация экспериментальных данных вполне соответствует современным представлениям о суперконденсаторе как о нелинейной системе, в которой емкость зависит от условий измерений, приложенных напряжения, частоты и т.д. Например, в [9] показано, что реакция суперконденсатора на вариации режима зарядки не согласуется с теорией линейного отклика. Обсуждается связь этой нелинейности с процессами в двойном электрическом слое, морфологией пористой обкладки и эффектом перезарядки пор. Вообще, физическая картина процессов, происходящих в суперконденсаторах даже в «равновесных» условиях, без облучения, далека от полного понимания. В основном, используются эмпирические подходы [10 – 15]. Авторы работы [10], посвященной моделированию суперконденсаторов, указывают на существование двух классов эмпирических моделей, учитывающих зависимость зарядки от величины приложенного напряжения (признак нелинейности), либо дробно-дифференциальных (линейных) моделей.

Результаты измерений кинетики разряда асимметричного суперконденсатора (см. рис. 3) указывают на существование нескольких стадий релаксации: первая – на временах  $10^2$  –  $10^3$  с, вторая – более пологая на больших временах. Недебаевская релаксация в суперконденсаторах – известный экспериментальный факт. В работе [9] измеряли динамику разрядки в далекой временной области (до  $10^4$  с) образцов суперконденсаторов емкостью до 1 Ф фирмы Panasonic с органическим электролитом и активированным углем в виде мелкодисперсной фракции в качестве обкладок – на малых временах зависимость тока от времени близка к закону растянутой экспоненты, на больших временах асимптотика кинетических кривых степенная.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью физического моделирования процессов в ИТРИ (источниках тока с радиоактивным изотопом) при нейтронном облучении суперконденсаторов с органическим электролитом производства ОАО «ЭЛЕКОНД» показано, что разделение и накопление электрического заряда не зависит от плотности потока нейтронов, а определяется дозой облучения и степенью асимметрии обкладок. В результате длительных процессов формирования двойного электрического слоя в органическом электролите после прекращения облучения электрическое напряжение между обкладками растёт.

Электрическое напряжение между обкладками симметричного суперконденсатора с емкостью 100 Ф в процессе облучения до поглощенной дозы 50 Гр растёт до 1,24 мВ. При облучении асимметричных суперконденсаторов с той же дозой значительный рост разности потенциалов до 1,15 В наблюдается в процессе облучения и в течение длительного времени после облучения ( $1,5 \cdot 10^5$  с) за счет перераспределения электрического заряда  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  Кл в электролите и углеродных частицах с формированием двойного электрического слоя. Пострadiационное увеличение емкости асимметричных суперконденсаторов составляет  $\sim 5$  мФ.

**Литература**

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. / Под ред. П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2005. – 590 с.
2. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Резнев А.А., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 2-6.
3. Ануфриенко В.Б., Ковалев В.П., Куликов А.В., Чернов В.А. Преобразователи ядерной энергии в электрическую на вторичных электронах // Российский химический журнал. – 2006. – Т. LV. – С. 120-125.
4. Ануфриенко В.Б., Михайлова А.М., Палагушкин А.Н., Сергеев А.П., Сигейкин Г.И., Сомов И.Е., Чернов В.А. Использование сверхмногослойных наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 30-38.
5. Чернов В.А., Палагушкин А.Н., Прудников Н.В., Сергеев А.П., Сигейкин Г.И., Леонова Е.А. Изготовление и исследование свойств наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую с использованием эмиссии вторичных электронов // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 11. – С. 2-9.
6. Чернов В.А., Митерев А.М., Прудников Н.В., Сигейкин Г.И., Леонова Е.А. Оптимизация состава и размеров источников тока, основанных на прямом преобразовании ядерной энергии в электрическую с использованием эмиссии вторичных электронов // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 8. – С. 21-26.
7. Чернов В.А., Степанов В.А., Прудников Н.В., Сигейкин Г.И., Леонова Е.А. Разработки наноструктурированных преобразователей энергии вторичных электронов для создания миниатюрных источников тока постоянной готовности // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 2. – С. 57-64.
8. Чернов В.А., Степанов В.А., Сигейкин Г.И., Прудников Н.В., Еремин В.П. Миниатюрные наноструктурированные источники тока на основе прямого преобразования ядерной энергии // Российский химический журнал. – 2016. – Т. LX. – № 3. – С. 20-25.
9. Учайкин В.В., Амброзевич А.С., Сибатов Р.Т., Амброзевич С.А., Морозова Е.В. Эффекты памяти и нелинейного транспорта в процессах зарядки-разрядки суперконденсатора // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 95-104.
10. Bertrand N., Sabatier J., Briat O., Vinassa J.M. Fractional Non-Linear modelling of ultracapacitors. // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 2010. – Vol. 15. – No. 5. – PP. 1327-1337.
11. Stidakova V., Sikula J., Majzner J., Seldak P., Kuparowitz T., Buergler B., Vasina P. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion // Journal of power sources. – 2015. – Vol. 286. – PP. 58-65.
12. Buller S., Karden E., Kok D., De Doncker R.W. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy // IEEE Trans Industry Appl. – 2002. – Vol. 38 (6). – PP. 1622-1626.
13. Ricketts B. W., Ton-That C. // Self Discharge of Carbon-Based Supercapacitors with Organic Electrolytes // Journal of Power Sources. – 2000. – Vol. 89. – No. 1. – PP. 64-69, 1999.
14. Yu A., Chabot V., Zhang J. Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – 373 p.
15. Shi L., Crow M.L. Comparison of ultracapacitor electric circuit models // Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, USA. – 2008. – PP. 1-6.

Поступила в редакцию 07.12.2017 г.

**Авторы**

Степанов Владимир Александрович, директор, зав. кафедрой, доктор физ.-мат. наук  
E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Чернов Владимир Алексеевич, зам. начальника лаборатории, доцент, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: vac.lnfi@ippe.ru

Паршиков Юрий Григорьевич, директор, доктор техн. наук  
E-mail: www.mzairan.ru

Лебедев Виктор Петрович, советник генерального директора, канд. техн. наук  
E-mail: lebedev18@live.ru

Харанжевский Евгений Викторович, главный конструктор, доцент, доктор техн. наук  
E-mail: eh@udsu.ru

UDC 621.3; 621.039

## **RADIATION-INDUCED SEPARATION AND ACCUMULATION OF ELECTRIC CHARGE IN SUPERCAPACITORS**

Stepanov V.A.<sup>1,2</sup>, Chernov V.A.<sup>3</sup>, Parshikov Yu.G.<sup>4</sup>, Lebedev V.P.<sup>5</sup>,  
Kharanzhevskiy E.V.<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> LLC «Laboratory of materials of Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering». 12 Pyatkinsky proezd, Obninsk, Kaluga reg., 249030 Russia

<sup>2</sup> Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

<sup>3</sup> JSC «SSC RF-IPPE». 1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

<sup>4</sup> FGBUN Interdepartmental Center of Analytical Researches in the Field of Physics, Chemistry and Biology at Presidium of RAS  
65 bld. 6 Profsoyuznaya st., Moscow, 117997 Russia

<sup>5</sup> JSC «ELECOND». 3 Kalinin st., Sarapul, Udmurt Republic, 427968 Russia

<sup>6</sup> Udmurt State University

1 Universitetskaya st., Izhevsk, Udmurt Republic, 426034, Russia

### ABSTRACT

In current source with radioactive isotope (CSRI), the direct conversion of nuclear energy into electrical energy occurs as a result of the separation of electric charges in the decay of radioactive isotopes. Previously it was shown that asymmetric supercapacitors can be CSRI, if after the pulse reactor irradiation and internal induced activity, the accumulation of electric charge occurs to several coulombs. In this paper, the separation and accumulation of electric charge in supercapacitors were studied during neutron irradiation (in situ). A source of neutrons was used for irradiation, which provided the absorbed dose rate up to 0.1 Gy/s. The electrophysical characteristics of cylindrical supercapacitors with organic electrolyte produced by OJSC «ELECOND» were studied. The symmetrical and asymmetric supercapacitors are compared. It is shown that the accumulation of charge effectively occurs in an asymmetric capacitor, does not depend on the neutron flux, but depend on the neutron dose. The electrical voltage between the electrodes of a symmetrical supercapacitor with a capacity of 100 F under irradiation to an absorbed dose of 50 Gy increases to 1.24 mV. Under irradiation with the same dose, there is a significant increase in the electrical voltage of asymmetric supercapacitors to 1.15 V. After long processes of the radiation-induced electric charge redistribution in the electrolyte and carbon nanoparticles and of formation of the electrical double layer, the electrical voltage between the electrodes and the capacitance increase after the irradiation stop. After irradiation through  $1.5 \cdot 10^5$  s the charge increases to  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  Cl. The post-radiation increase in the capacitance of asymmetric supercapacitors is  $\sim 5$  mF.

**Key words:** supercapacitor, neutron irradiation, radiation-induced electric charge.

### REFERENCES

1. *Nano- and microsystem technology. From research to development.* Ed. by P.P. Maltsev.

- Moscow. Tekhnosfera Publ., 2005, 590 p. (in Russian).
2. Verner V.D., Maltsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Current trends of development of the microsystem equipment. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2008, no. 8, pp. 2-6 (in Russian).
  3. Anufrienko V.B., Kovalev V.P., Kulikov A.V., Chernov V.A. Converters of nuclear energy in electric on secondary electrons. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2006, v. LV, pp. 120-125 (in Russian).
  4. Anufrienko V.B., Mikhailova A.M., Palagushkin A.N., Sergeev A.P., Sigeikin G.I., Somov I.E., Chernov V.A. Use of supermultilayered nanostructures for direct transformation of nuclear energy to electric. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2008, no. 8, pp. 30-38 (in Russian).
  5. Chernov V.A., Palagushkin A.N., Prudnikov N.V., Sergeev A.P., Sigeikin G.I., Leonova E.A. Production and research of properties of nanostructures for direct transformation of nuclear energy in electric with use of issue of secondary electrons. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2010, no. 11. pp. 2-9 (in Russian).
  6. Chernov V.A., Miterev A.M., Prudnikov N.V., Sigeikin G.I., Leonova E.A. Optimization of structure and the sizes of the sources of current based on direct transformation of nuclear energy in electric with use of issue of secondary electrons. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2011, no. 8, pp. 21-26 (in Russian).
  7. Chernov V.A., Stepanov V.A., Prudnikov N.V., Sigeikin G.I., Leonova E.A. Developments of the nanostructured converters of energy of secondary electrons for creation of tiny sources of current of constant readiness. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2015, no. 2. pp. 57-64 (in Russian).
  8. Chernov V.A., Stepanov V.A., Sigeikin G.I., Prudnikov N.V., Eremin V.P. Tiny nanostructured current sources on the basis of direct transformation of nuclear energy. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2016, v. LX, no. 3, pp. 20-25 (in Russian).
  9. Uchaikin V.V., Ambrozevich A.S., Sibatov R.T., Ambrozevich S.A., Morozova E.V. Memory and nonlinear transport effect in charging-discharging of a supercapacitor. *Zhurnal Technicheskoy Fiziki*. 2016, v. 1, no. 2, pp. 250-259 (in Russian).
  10. Bertrand N., Sabatier J., Briat O., Vinassa J.M. Fractional Non-Linear modelling of ultracapacitors. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010, v. 15, no. 5, pp. 1327-1337.
  11. Stldakova V., Sikula J., Majzner J., Seldak P., Kugarowitz T., Buergler B., Vasina P. Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion. *Journal of Power Sources*. 2015, v. 286, pp. 58-65.
  12. Buller S., Karden E., Kok D., De Doncker R.W. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy. *IEEE Trans Industry Appl.* 2002, v. 38 (6), pp. 1622-1626.
  13. Ricketts B. W., Ton-That C. Self Discharge of Carbon-Based Supercapacitors with Organic Electrolytes. *Journal of Power Sources*. 2000, v. 89, no. 1, pp. 64-69, 1999.
  14. Yu A., Chabot V., Zhang J. *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications* CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 373 p.
  15. Shi L., Crow M.L. Comparison of ultracapacitor electric circuit models. *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, USA*. 2008, pp. 1-6.

#### Authors

Stepanov Vladimir Aleksandrovich, Director, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Chernov Vladimir Alekseevich, Deputy Head of the Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vac.lnfi@ippe.ru

Parshikov Yuriy Grigorievich, Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: www.mzairan.ru

Lebedev Viktor Petrovich, Advisor to Director General, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: lebedev18@live.ru

Kharanzhevskiy Evgeny Viktorovich, Chief Designer, Assistant Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: eh@udsu.ru