

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*доктора физико-математических наук Родионова Николая Борисовича на диссертацию Бутакова Дениса Сергеевича «Автономные источники питания конденсаторного типа с прямым преобразованием энергии распада радиоизотопов в электричество», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.*

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время одним из перспективных направлений создания компактных источников энергии, способных работать в автономном режиме длительное время, является разработка устройств, преобразующих энергию распада радиоактивных изотопов в электрический ток. На базе таких элементов можно будет создать простой, компактный и безопасный источник энергии, способный давать энергию в течении десятков лет. Такой источник будет необходим в различных отраслях экономики (аэрокосмическая отрасль, медицина, микроэлектроника, коммуникация, оборона и т. д.), он может быть установлен в мобильный телефон, в кардиостимулятор, в систему дистанционного управления на автомобиль, космический аппарат и т. д. Существуют различные способы преобразования энергии радиоактивного распада в электрический ток.

В настоящее время уделялось большое внимание устройствам, которые состоят из источника радиоактивного излучения, например, бета-вольтаического источника и полупроводникового радиационно-стойкого элемента для преобразования ионизирующего излучения в электричество. Такие устройства имеют ряд недостатков, связанных радиационной стойкостью полупроводникового преобразователя, большим поглощением в случае бета-излучения вне p-n перехода.

Диссертационная работа посвящена автономным источникам питания конденсаторного типа, преобразующих излучение радиоактивных изотопов в электрическую энергию. Источник питания конденсаторного типа, рассматриваемый в диссертации, обладает рядом преимуществ по сравнению с источниками в которых преобразование энергии радиоактивного элемента в электричество происходит на полупроводниковом элементе.

1. Отсутствие повреждаемых структур преобразователя позволяет использовать источники бета-излучения с высокой энергией распада.

2. Представленные в работе источники питания могут быть использованы как в режиме постоянной нагрузки, так и в импульсном режиме, что в свою очередь расширяет возможности их практического использования.

3. Данное направление является по своей сути развитием технологии супер-конденсаторов для создания хранилищ электрической энергии.

Таким образом, выбранная Д.С. Бутаковым тема диссертации является актуальной и нацелена на решение важной задачи разработки автономных источников питания для нужд космоса, малых беспилотных аппаратов, индустрии микроэлектромеханических устройств, медицины, систем безопасности и др.

### ***Достоверность и степень обоснованности положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Достоверность и обоснованность основных научных результатов диссертации Д.С. Бутакова обеспечивается выбранной методологией исследования, применением современного, высокоточного и метрологически аттестованного испытательного и аналитического оборудования.

По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных трудов, из них 4 статьи в журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 статьи в изданиях входящих в международную базу цитирования Scopus, получено 2 патента РФ.

Все изложенное позволяет сделать заключение о достоверности положений, выносимых на защиту.

### ***Характеристика структуры и содержания диссертации***

Диссертационное исследование содержит введение, пять глав, заключение, и список литературы из 74 наименований. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка и 38 таблиц.

Во введение приводится общая характеристика работы, представлено обоснование актуальности выбранного исследования, определяются цели и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе, диссертантом представлен подробный литературный обзор, классификация автономных радиоизотопных источников питания с учетом их выходных энергетических характеристик. Уделено большое внимание применению источников питания на радиоизотопах. Рассмотрен принцип действия и устройство бета-вольтаических источников питания, а также и принцип действия самозаряжающихся источников питания конденсаторного типа их конструктивные особенности и достигнутые



выходные энергетические характеристики. Рассмотрены автономные радиоизотопные источники питания супер-конденсаторного типа. В заключении данной главы сформулирована цель и основные задачи работы.

Вторая глава посвящена разработке материалов и конструкции автономного радиоизотопного источника питания конденсаторного типа. Автором диссертационной работы приводятся критерии отбора различных бета-излучающих радиоизотопов для оценки перспектив их использования. С учетом таких факторов, как наличие доступного сырья, технологий переработки, стоимостных параметров, автором было установлено, что наиболее перспективными, в настоящее время, для широкого промышленного внедрения в источниках питания конденсаторного типа наиболее являются радиоизотопы  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . В главе рассматривается электрохимическое поведение образцов материалов, предназначенных для изготовления корпуса источника питания. На основании проведенных исследований в качестве основного конструкционного материала корпуса выбран титан марки ВТ 1-0, как наиболее коррозионностойкий материал. Проводятся электрофизические и электрохимические исследования влияния ионизирующего излучения на свойства ионной жидкости, используемой в качестве электролита в автономном радиоизотопном источнике питания. Разработана технология синтеза углеродных электродов модифицированных добавкой радиоизотопа  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , конструкция и технология изготовления автономного радиоизотопного источника питания конденсаторного типа.

В третьей главе представляются результаты исследования вольт-амперных характеристик радиоизотопных источников питания. Для проведения цифровых измерений и визуального отображения текущих значений электрических характеристик испытуемых АИП был изготовлен экспериментальный стенд, на основе микроконтроллерных модулей ADAM. Приводятся технические характеристики экспериментального стенда. Представлены методики и результаты испытаний. Целью проводимых испытаний, являлось определение выходных энергетических характеристик АИП, а также выбор и обоснование оптимальных технических решений. В заключении главы автор приводит структурную схему автономного радиоизотопного источника питания конденсаторного типа, а также качественное описание основных физических процессов, протекающих в нем.

Четвертая глава посвящена стендовым испытаниям автономных источников питания конденсаторного типа для обоснования их использования в электронной компонентной базе. В рамках данной главы автором представлены методики и результаты механических, ускоренных

радиационных и климатических испытаний

В пятой главе автором демонстрируется практическое использование автономных радиоизотопных источников питания разработанных в рамках диссертационной работы для изготовления модуля периодической активации. Проводятся его лабораторные энергетические исследования и экспериментально определяется значение максимальной выходной мощности в зависимости от длительности импульса.

В заключение сформулированы основные результаты работы, приведены рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследования.

### *Научная новизна исследования*

В диссертационной работе Д.С. Бутакова получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. В рамках работы представлены конструкции автономных радиоизотопных источников питания конденсаторного типа, разработаны новые технологии изготовления углеродных электродов, содержащих радиоизотоп  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  и лабораторная технология изготовления автономных радиоизотопных источников питания конденсаторного типа.

2. Полученные в работе удельные энергетические характеристики на источниках питания прямого преобразования при постоянной нагрузке  $6 \text{ мкВт/см}^3$  и в импульсном режиме  $690 \text{ мкВт/см}^3$ , существенно превышают достигнутые мировые значения на подобного типа устройствах.

3. Впервые получены экспериментальные данные по испытаниям автономных источников питания конденсаторного типа в диапазоне температур от  $-65$  до  $+130$  °С, воздействию внешних радиационных нагрузок до  $100$  крад и внешних механических нагрузок.

### *Замечания по диссертации*

Положительно оценивая диссертацию в целом, ее логику, обоснованность, достоверность, полученные новые научные результаты, теоретическую и эмпирическую базу исследования, следует выделить следующие дискуссионные положения, недостатки и замечания:

1. В второй главе не указано какие радиоизотопы анализировал диссертант и какие дополнительные критерии именно им добавлены (стр. 40).



2. При рассмотрении импульсного источника не указано почему для импульсного режима рассматривается скважность только 1000.

3. Неоднозначное описание гибридной сборки в главе 5:

На стр. 124. «Гибридная сборка, состоит из АИП (радиоизотопный источник питания конденсаторного типа), накопителя энергии (конденсатора) и интегральной схемы».

На стр. 129 «Гибридная сборка состоит из модуля радиоизотопного источника питания и ядерной батареи».

4. В главе 5 на рисунках 77-85 не указана размерность по оси x. По оси Y не указаны в каких единицах измеряется напряжение.

5. В главе 5 на стр.135 написано «Результаты определения максимальной выходной мощности при сопротивлении 200 Ом представлены в таблицах 37-38». В работе не обсуждается почему рассматривается именно 200 Ом.

6. В главе 5 не описана цель изготовления «модуля периодической активации» (например, стр. 124).

### *Заключение*

Диссертация Бутакова Дениса Сергеевича на тему «Автономные источники питания конденсаторного типа с прямым преобразованием энергии распада радиоизотопов в электричество», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Полученные в рамках диссертационного исследования результаты имеют существенное теоретическое и прикладное значение, что подтверждается полученными патентами. Основные положения диссертации подтверждены результатами проведенных экспериментальных исследований.

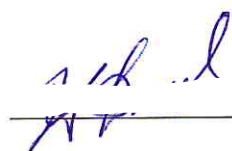
Диссертация и автореферат соответствуют пункту 2. Разработка экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники, паспорта специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Автореферат диссертации Д.С. Бутакова полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Бутаков Денис Сергеевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

**Официальный оппонент:**

Главный научный сотрудник  
лаборатории проблем физики  
токамаков отделения физики  
токамаков – реакторов и  
токонесущей плазмы,  
АО «Государственный научный  
центр  
Российской Федерации Троицкий  
институт инновационных и  
термоядерных исследований»,  
доктор физико-математических наук



Родионов Николай Борисович

*Контактная информация:*

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,  
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12  
Адрес электронной почты: [rodionovnb@gmail.com](mailto:rodionovnb@gmail.com)

«29» ноября 2024 г.

Подпись д.ф.-м.н. Родионова Н.Б. заверяю:  
Начальник отдела кадров

