

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Бутакова Дениса Сергеевича «Автономные источники питания конденсаторного типа с прямым преобразованием энергии распада радиоизотопов в электричество» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

### Актуальность темы

Источники питания, принцип действия которых основан на прямом преобразовании энергии распада радиоизотопов в электрическую энергию, представляют большой интерес с точки зрения их применения в аппаратуре различного назначения для организации автономного электропитания. Этот интерес определяется рядом достоинств, которыми обладают данные источники питания, таких, как длительный срок активного использования без потери выходной мощности (десятки лет), автономность, компактные размеры, малая масса и др. Использование в качестве автономных источников питания (АИП) самозаряжающихся конденсаторов с интегрированным в электроды радиоизотопом представляется достаточно перспективным направлением развития тематики АИП в силу ряда причин. Во-первых, в отличие от бета-вольтаических источников питания, такие изделия не содержат полупроводникового преобразователя энергии бета-частиц в электрическую энергию, а, следовательно, они могут быть практически не чувствительными к деградации за счет радиационного дефектообразования. Во-вторых, вследствие низкой чувствительности к радиационному дефектообразованию в таких изделиях возможно использование радиоизотопов с более высокой энергией распада и более высокой эффективностью ионизации облучаемого материала продуктами радиационного распада. Причем в данном случае возможно применение не только бета-активных, но и альфа-активных радиоизотопов. В-третьих, существующие технологии создания суперконденсаторов вполне допускают интеграцию в конструкцию таких изделий радиоизотопов, что позволяет создавать АИП конденсаторного типа, обладающие высокой удельной мощностью как в режиме постоянного тока, так и в импульсном режиме, не достижимой для изделий бета-вольтаики, основанных на использовании полупроводниковых преобразователей энергии. Следует отметить, что вопрос создания АИП конденсаторного типа в настоящее время является мало изученным и при этом инновационным. Диссертация Д.С. Бутакова направлена на проведение исследований и разработок в данной области и поэтому является актуальной.

Целью диссертации являлись разработка и исследования самозаряжающихся суперконденсаторов с удельной мощностью более  $5 \text{ мкВт/см}^3$ , работающих как в режиме постоянного тока, так и в импульсном режиме, для применения в различных областях науки и техники. Для достижения указанной цели автором решались следующие задачи: разработка технологии синтеза углеродсодержащих материалов с интегрированным радиоизотопом  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  и исследование перспективных конструкционных материалов, используемых в АИП конденсаторного типа;

разработка конструкции и технологии изготовления АИП конденсаторного типа с радиоизотопами  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  и ионными жидкостями; проведение экспериментальных исследований характеристик АИП конденсаторного типа; разработка методик и проведение испытаний АИП конденсаторного типа на стойкость к воздействию климатических, механических и радиационных факторов; проведение исследований работоспособности реальной электрической системы при её энергообеспечении с помощью АИП конденсаторного типа.

### **Оценка научной новизны результатов диссертации**

В диссертации Д.С. Бутакова был получен ряд результатов, характеризующихся научной новизной. К основным таким результатам можно отнести следующее:

- во-первых, к таким результатам следует отнести разработанные конструкции АИП конденсаторного типа и лабораторную технологию их изготовления, а также разработанные технологии изготовления углеродных электродов с интегрированным радиоизотопом  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ;
- во-вторых, впервые для АИП, основанных на прямом преобразовании энергии распада радиоизотопов в электрическую энергию, достигнуты рекордные значения удельной мощности —  $6 \text{ мкВт/см}^3$  при постоянной нагрузке и  $690 \text{ мкВт/см}^3$  в импульсном режиме, что существенно превышает достигнутые значения для бета-вольтаических АИП, как отечественных, так и зарубежных;
- в-третьих, получены новые экспериментальные результаты исследования работоспособности АИП конденсаторного типа при воздействии внешних климатических, механических и радиационных нагрузок, характерных для условий космического применения.

### **Практическая значимость результатов диссертации**

Практическая значимость результатов диссертации Д.С. Бутакова определяются следующим:

- разработанные конструкции и основы технологии изготовления АИП конденсаторного типа с радиоизотопами  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  и ионными жидкостями позволяют существенно повысить удельную мощность источников питания, что существенно расширяет возможности их практического применения;
- разработаны и созданы лабораторные образцы АИП конденсаторного типа с радиоизотопами  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  и ионными жидкостями, на основе которых возможно создание источников питания, достаточных для энергообеспечения устройств с низким потреблением энергии;
- полученные результаты испытаний АИП конденсаторного типа на стойкость к воздействию внешних климатических, механических и радиационных факторов позволяют сделать вывод о том, что данные источники питания могут рассматриваться как кандидаты для применения на борту космических аппаратов.

## Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью постановки задач, существенным объемом полученных экспериментальных данных, применением в исследованиях современного технологического, измерительного и испытательного оборудования, воспроизводимостью результатов и оценкой погрешности измерений, апробацией и обсуждением основных результатов на Российских и отраслевых научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях.

Из приложенного списка публикаций Д.С. Бутакова видно, что все основные результаты и выводы диссертационной работы в достаточном объеме опубликованы в авторитетных изданиях. По теме диссертационного исследования опубликовано 10 научных трудов, включая 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Автором получено 2 патента Российской Федерации. Все это подтверждает достоверность результатов и выводов работы.

## Краткая характеристика основного содержания работы

Диссертация Д.С. Бутакова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников (74 наименования). Оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

**Во введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, определена цель проводимых исследований и сформулированы основные задачи. Представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения по апробации результатов диссертации и их опубликованию. Рассмотрен личный вклад автора.

**Первая глава** представляет собой обзор литературных данных по тематике диссертации. Здесь приведена классификация автономных радиоизотопных источников питания и проанализированы области их применения. Рассмотрено устройство и принцип действия бета-вольтаических источников питания, содержащих полупроводниковый преобразователь энергии распада радиоизотопа в электрическую энергию, проанализированы возможные конструктивно-технологические способы повышения КПД и выходной мощности АИП бета-вольтаического типа. Рассмотрено устройство и принцип действия АИП конденсаторного типа, включая особенности конструктивно-технологического исполнения и достигнутые технические характеристики.

**Вторая глава** посвящена разработке материалов и конструкции АИП конденсаторного типа. Здесь приведены основные требования, предъявляемые к конструкционным элементам АИП, на основе анализа которых был обоснован выбор радиоизотопа  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  для использования при изготовлении АИП. Приведены результаты исследований по обоснованию материалов электродов, при этом рассматривались различные материалы — нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титан ВТ 1-0, медь, алюминий, стеклоуглерод, а в качестве агрессивной среды рассматривались растворы серной и ортофосфорной кислот различной концентрации. Приведены

результаты исследования воздействия ионной жидкости на образцы, изготовленные из фольги нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титана ВТ 1-0. По результатам исследований был определен оптимальный материал для изготовления электродов — титан ВТ 1-0. Проведены исследования электрофизических и электрохимических свойств различных ионных жидкостей и влияния на них воздействия ионизирующего излучения. Приведено описание двух технологических вариантов получения углеродных материалов, допированных радиоизотопом  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , а также результаты исследования получаемых материалов. Также приведено описание выбранной конструкции АИП и технологической схемы их изготовления.

**В третьей главе** приведены результаты исследований характеристик изготовленных образцов АИП конденсаторного типа. Здесь описан экспериментальный стенд, использовавшийся для измерения характеристик образцов АИП. Представлена методика определительных испытаний образцов АИП, а также приведены полученные результаты этих испытаний. Приведено описание последовательности энергетических испытаний демонстрационных образцов АИП и представлены полученные экспериментальные результаты данных испытаний. В конце главы проведен анализ физических процессов, лежащих в основе принципа действия АИП конденсаторного типа.

**Четвертая глава** посвящена результатам стендовых испытаний АИП конденсаторного типа, которые проводились с целью обоснования возможности применения разработанных радиоизотопных источников питания в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Здесь приведены результаты механических испытаний (воздействие вибрационных нагрузок, прочность при транспортировке, воздействие механического удара), ускоренных радиационных испытаний (воздействие ионизационной поглощенной дозы гамма-излучения), климатических испытаний (определение температурного диапазона эксплуатации для разработанных образцов АИП конденсаторного типа).

**В пятой главе** представлены результаты, полученные при использовании разработанных АИП конденсаторного типа в составе электронного модуля периодической активации, выполненного в виде гибридной схемы и состоящего из АИП, накопителя в виде конденсатора и интегральной схемы. Для разработанного электронного модуля были определены значения максимальной амплитуды импульсов напряжения и максимальной выходной мощности для двух различных импульсных режимов.

**В заключении** подведены итоги проведенных исследований, сформулированы основные выводы, приведены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В конце работы приведен **список используемых источников** (74 позиции).

#### **Замечания по диссертации**

1. Предложенные в работе варианты технологии синтеза углеродных электродов с добавкой  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  приведены без какого-либо обоснования выбора исходных компонентов, их количеств и массовых соотношений, составов растворов, последовательности и режимов операций и т.д. Кроме того, не ясно, во-первых, дают ли выбранные технологические варианты оптимальный результат, а во-

вторых, можно ли как-то сравнить между собой результаты реализации этих двух выбранных технологических вариантов.

2. Отсутствует обоснование выбора режимов определительных испытаний образцов АИП и энергетических испытаний демонстрационных образцов АИП (время зарядки и разрядки, нагрузочное сопротивление). По результатам, представленным в п. 3.3, не понятно, достигнута ли в полном объеме цель определительных энергетических испытаний образцов АИП, указанная в п. 3.2, а именно, определение выходных энергетических характеристик АИП, выбор и обоснование оптимальных технических решений.
3. Приведенное в п. 3.4 значение эффективности преобразования (7,7 %) рассчитано для конкретного момента времени (25 ч) и конкретного сопротивления нагрузки (99,9 кОм). Уместнее было бы исследовать динамику спада выходного напряжения и выходной мощности в зависимости от сопротивления нагрузки.
4. Несмотря на то, что разработанный АИП представляет собой самозаряжающийся конденсатор, в работе отсутствуют результаты измерения типичных эксплуатационных характеристик конденсаторов: электрической ёмкости, сопротивления изоляции, тангенса угла потерь.
5. При исследовании электронного модуля периодической активации (глава 5), в состав которого входит разработанный АИП, не указано функциональное назначение данного модуля и требования к его техническим характеристикам, не представлена структурная и/или электрическая схема данного модуля, отсутствует информация о технических характеристиках элементов, входящих в его состав (накопитель в виде конденсатора, интегральная схема). Это крайне затрудняет оценку результатов применения АИП в составе данного модуля.

Указанные замечания не снижают научную новизну и практическую ценность диссертации и не оказывают существенного влияния на высокую оценку работы в целом.

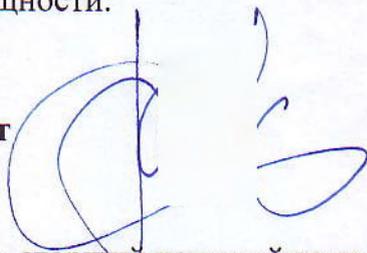
### **Заключение**

Диссертация Д.С. Бутакова является законченным научным исследованием, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа соответствует квалификационным признакам диссертации, определяющим характер результатов кандидатской диссертационной работы. Полученные автором результаты обладают научной новизной, имеют существенное практическое значение, достоверны. По диссертации сделаны четкие и обоснованные выводы и заключения. Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации. Опубликованные по теме диссертации работы в полной мере отражают её сущность.

Считаю, что диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина» в его действующей редакции, а её автор, Денис Сергеевич Бутаков, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» за решение важной и актуальной задачи по разработке автономных радиоизотопных источников питания конденсаторного типа с рекордными значениями удельной мощности.

Официальный оппонент



Таперо Константин Иванович

19.11.2024г.

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заместитель генерального директора по науке и инновациям  
Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборов»  
(АО «НИИП»)

Адрес: 140080, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, строение 8.

Тел.: 8-495-663-90-95.

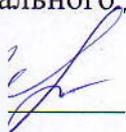
E-mail: [kitapero@niipribor.ru](mailto:kitapero@niipribor.ru)

Сайт организации: <http://www.niipribov.ru/>

Подпись д.т.н. Таперо К.И. заверяю:

Заместитель генерального директора АО «НИИП» по управлению персоналом



 / Л.А. Чернякова