

# Ядерные батареи будущего

Андрей Ласорла

Автономные источники электропитания, способные работать без подзарядки десятилетиями, востребованы во многих отраслях промышленности: от космоса до медицины. Из новых трендов стоит отметить ядерные (они же радиоизотопные или атомные) электрические батареи на основе радионуклидов миниатюрного форм-фактора. В обзоре рассматриваются уже созданные условно «вечные» элементы питания на основе радионуклидов, а также аспекты развития инженерной мысли в области ядерных электрических батарей, процессоров и элементов питания, накапливающих энергию из внешней среды.

## Тенденции в разработке автономных источников питания

Ядерные батареи – автономные источники тока, в которых энергия радиоактивного распада метастабильных ядер преобразуется в электрический ток. В зависимости от конкретной задачи в таких батареях используются а- и б-активные ядра с периодом полураспада нуклидов  $T_{1/2}$  от сотни дней до сотни лет. Выбор ядра специального источника питания зависит также от режима эксплуатации РЭА и других условий. Пока такие электрические батареи работают в условиях очень малой мощности, но перспективы для совершенствования изделий и технологии огромны. К слову, все достойные внимания разработчики РЭА в мире конкурируют за создание микроконтроллеров конфигурации RISC-V со сверхнизким энергопотреблением, работающих исключительно за счёт сбора энергии из внешней среды: преобразования энергии тепла, света, радиоволн, химической среды и даже продуктов потовых желёз человека и животных. Да, пока такие источники автономного «самопитания» обладают чрезвычайно малой мощностью, но они уже существуют и применяются, в частности, при взаимодействии с имплантатом в устройствах медицинской микроэлектроники. Иногда батарея, аккумулятор или даже ионистор в качестве элемента питания действительно не подходят, если вы проектируете устройство сверхнизкого энергопотребления. В этой связи рассмотрение технологий создания электрических батарей на основе изотопов с ядерным принципом действия представляется весьма актуаль-

ным. Конфигурация RISC-V касается микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением с периферийными устройствами на основе стандартной технологии КМОП и инструментов Cadence Design Systems с открытым исходным кодом. Используется 32-битное ядро RISC-V, специально разработанное для обеспечения супернизкого энергопотребления и встроенной функцией сбора энергии. Среди преимуществ масштабируемая, настраиваемая память с низким энергопотреблением, беспроводной интерфейс с поддержкой Bluetooth Low Energy и радиоканал в формате IEEE802.15.4 на одном чипе, протоколы Matter и другие особенности ПО. Уже несколько лет доступны саморастворяющиеся имплантаты и даже водорастворимые в горячей воде печатные платы, что удобно для безопасной и полной переработки. На фоне этих инноваций прототип радиоизотопной батареи малой и средней мощности на основе бета-распада никеля-63, плутония-238 (и других изотопов), а также параллельные разработки по созданию ядерной электрической батареи в КНР представляют огромный интерес.

## Выбор радиоизотопа и схемы преобразования

Области применения ядерных батарей разнообразны: они незаменимы на территориях, удалённых от инфраструктуры, к примеру, в Арктике, на больших глубинах, на газо- и нефтепроводах большой протяжённости, в космосе, в устройствах, обеспечивающих специальную связь, и в медицине: везде, где требуется длительный мониторинг без возможности подзарядки

или замены источников энергии. Для изотопных источников применительно к кардиостимуляторам или датчикам артериального давления, электронным анализаторам крови подходят только плутоний-238 и никель-63. Требования безопасного радиоизотопа сужает возможности, поскольку радионуклиды при распаде должны распадаться либо переходить в состояние дочернего ядра. Кроме выбора радионуклида принципиально важным при разработке радиоизотопных источников энергии является выбор схемы преобразователя энергии ядерного распада в электрический ток. На практике преобразование осуществляется по непрямоугольному ступенчатому принципу: кинетическая и кулоновская энергия альфа- и бета-частиц сначала превращаются в тепловую, химическую, механическую, световую и другие виды энергии, а затем – в электрическую.

Концепция оригинальной физической системы на основе  $^{63}\text{Ni}$  предложена группой учёных из Института «Лангмюа» под руководством Петра Борисюка [7]. Если обеспечить условия эффективной генерации вторичных электронов непосредственно внутри наноструктурированных плёнок никеля и значительно увеличить токовый сигнал, вызванный каскадом многократных неупругих соударений бета-частиц, на выходе экспериментальной реализации получают относительно простую систему, но довольно результативную с точки зрения состава плотно упакованных нанокластеров никеля с градиентным распределением наночастиц по размеру, осаждённых на поверхности широкополосного диэлектрика – оксида кремния [7]. Вследствие размерной зависимости энергии Ферми наличие пространственно-неоднородного распределения металлических наночастиц по размерам приводит к пространственному перераспределению заряда в электропроводящей системе соприкасающихся друг с другом металлических наночастиц. Их средний размер изменяется в выделенном направлении, что приводит к возникновению разности потенциалов на полярных выходах (напряжению). Объяснением этого эффекта с помощью знаний физики ядерной



Рис. 1. Внешний вид батареи BV-100 фирмы Betavolt

реакции является демонстрация формирования нанокластерных плёнок никеля-63 с градиентным распределением наночастиц. В процессе реакции достигают двух эффектов. Во-первых, формируются покрытия с фиксированной разностью потенциалов (определяется разницей размеров наночастиц в выделенном направлении); во-вторых, происходит преобразование энергии бета-распада  $^{63}\text{Ni}$  в ток электронов (электрический ток) без использования дополнительных сложных для реализации полупроводниковых систем.

Исследование электрофизических свойств формируемой нанокластерной плёнки никеля и подбор оптимальных параметров эксперимента для создания эффективного преобразователя энергии бета-распада  $^{63}\text{Ni}$  в электричество впервые были опубликованы в журнале Applied Physics Letters коллективом авторов [7]. Поскольку наноструктурированные плёнки могут использоваться в качестве селективного фотоэмиттера – системы с перераспределённым спектром излучения в заданном спектральном диапазоне, процесс окисления плёнки приводил к образованию оксидной оболочки поверх металлического ядра нанокластера. Затем происходило формирование совокупности металлических нанокластеров с их пространственным распределением по размерам, но в одном слое (оболочке) оксида. Относительно малые размеры нанокластеров (2–15 нм) способствуют проявлению квантовых свойств полупроводниковых материалов с широким разбросом значений ширины запрещённой зоны, а это обеспечивает возможность эмиссии фотонов заданной длины волны при нагреве и, следовательно, обеспечивает возможность коррекции спектра излучения под определённый диапазон длин волн. Это важное отличие

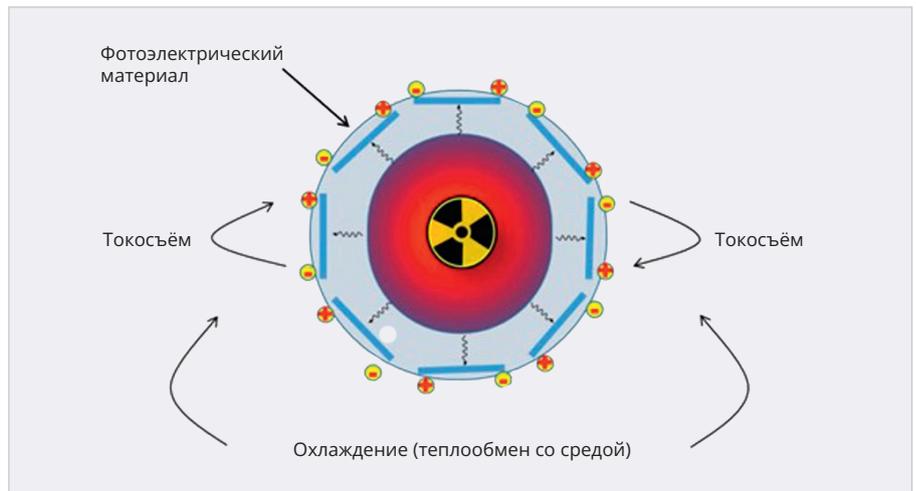


Рис. 2. Иллюстрация синтеза полураспада изотопов, применяемых в батарее BV-100

перспективного открытия в разработке отечественных ученых, поэтому энергоэффективность и энергосбережение современных тепловых источников электроэнергии может выйти на новый уровень. Понимая конкурентное значение технологии, подобными исследованиями занимаются во всём мире.

### Китайские успехи

Китайский стартап Betavolt из Пекина представил первую в мире миниатюрную аккумуляторную батарею с ядерной начинкой: модель BV-100. Первенство объясняют тем, что это первый случай, когда атомная энергия реализована в столь миниатюрной модели. Модуль размером  $15 \times 15 \times 5$  мм содержит 63 разновидности атомов (и ядер) химических элементов (изотопов). Отсюда и название батареи – «ядерная». Миниатюризация – основной отличительный признак инновации. Батареи можно подключать параллельно и последовательно, создавая модули в электрической цепи для увеличения мощности источника питания и суммарного напряжения. Заявленная мощность одной батареи с изотопом никель-63 и алмазными полупроводниками сравнима с источником автономного питания в 100 мкВт, а напряжение составляет 3 В постоянного тока [6]. Размеры батареи меньше средней монеты. На рис. 1 представлен внешний вид изделия.

Принцип работы батареи основан на преобразовании энергии, выделяемой при распаде изотопов, в электрический ток. Соответственно, речь идёт об источнике энергии, у которого понятие саморазряда отсутствует вообще, а рабочий процесс начинается только

после подключения в электрическую цепь (при подключении к контактам батареи устройств нагрузки).

Изотопы никеля – разновидности химического элемента никеля, имеющие разное количество нейтронов в ядре. Известны изотопы никеля с массовыми числами от 48 до 80 (количество протонов 28, нейтронов от 20 до 52) и 8 ядерных изомеров. Природный никель получил распространение как источник для ионизации захватом электрона (ион-мобильная спектрометрия, детекторы электронного захвата в газовой хроматографии) и представляет собой смесь пяти стабильных изотопов:  $^{58}\text{Ni}$  (изотопная распространённость – ИР – 68,27%),  $^{60}\text{Ni}$  (ИР – 26,10%),  $^{61}\text{Ni}$  (ИР – 1,13%),  $^{62}\text{Ni}$  (ИР – 3,59%),  $^{64}\text{Ni}$  (ИР – 0,91%). Среди искусственных изотопов самые долгоживущие –  $^{59}\text{Ni}$  (период полураспада 76 тыс. лет) и  $^{63}\text{Ni}$  (период полураспада порядка 100 лет), а период полураспада некоторых других изотопов не превышает нескольких суток. Дочерний изотоп – стабильный  $^{63}\text{Cu}$  – получают облучением нейтронами в ядерном реакторе стабильного изотопа  $^{62}\text{Ni}$ .

На рис. 2 представлена иллюстрация синтеза полураспада изотопов, применяемых в батарее BV-100.

Используемый в новой атомной батарее  $^{63}\text{Ni}$  – наиболее перспективный радионуклид в бета-вольтаике: средняя энергия бета-частиц  $^{63}\text{Ni}$  17,5 кэВ (и максимальная энергия 67 кэВ), период полураспада 100,1 лет; к нему можно создать физическую защиту от мягкого бета-излучения источника в миниатюрном элементе питания.

Модуль BV-100 рекомендован к применению в широком спектре современных электронных устройств: в сотовых

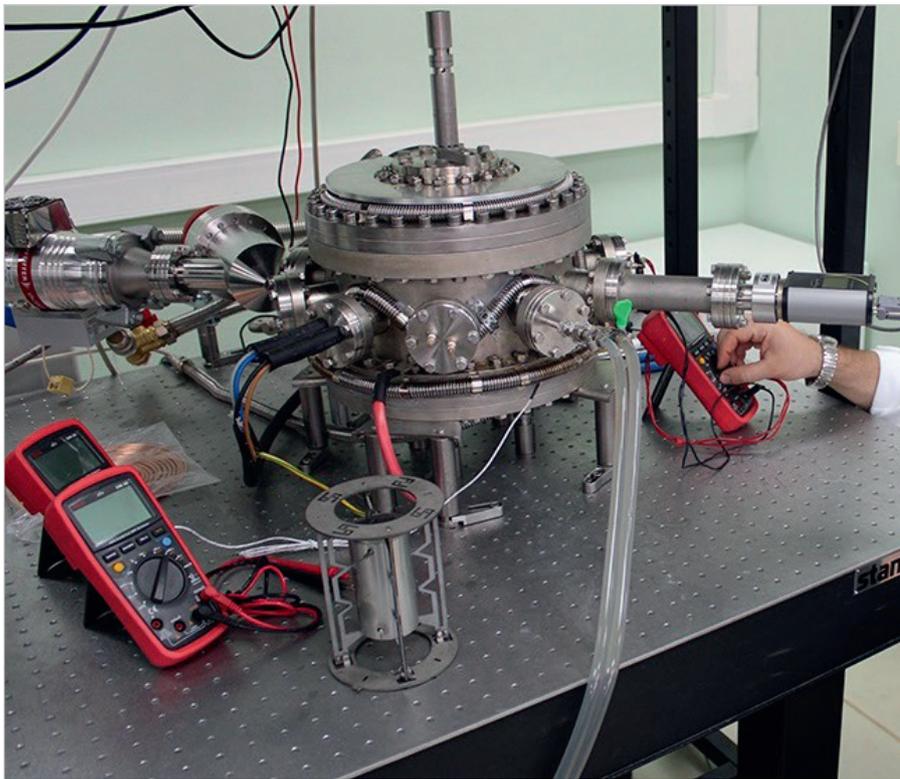


Рис. 3. Внешний вид лабораторного источника электроэнергии в НИЯУ «МИФИ»

телефонах и радиостанциях, робототехнике (миниатюрных роботах), БПЛА, устройствах с ИИ, медицинских электронных приборах и датчиках разного назначения, в том числе работающих удалённо от основного блока управления или сервера. Особую роль пророчат изобретению в аэрокосмической промышленности, в частности, в микропроцессорной технике. Батарея имеет многослойную конструкцию, устойчива к огню и даже сильному воздействию детонации, приравняемому к взрывной среде. Сохраняет функциональность в температурном диапазоне от  $-60$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ . При этом модуль безопасен и не имеет излучения, ибо в процессе отдачи электроэнергии изотопы распадаются, превращаясь в стабильные и нерадиоактивные изотопы меди. Атомная батарея не имеет внешнего радиоактивного излучения, пригодна для использования даже в условиях высоких требований к стерильности: в медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы, мониторы разного назначения, элементы искусственного сердца, соприкасающиеся с телом человека.

Модуль позиционируют не только «ядерным», но и «вечным», ведь его не надо заряжать. Но это не означает, что электронные устройства с питанием от «волшебной таблетки» могут работать вечно. Заявлено, что батарея

может храниться 50 лет без подзарядки и иного обслуживания. Пока не ясно, какими испытаниями этот срок установлен, но он заявлен производителем в анонсе [6]. Также непонятно, нужны ли батареи со столь длительным сроком эксплуатации в смартфонах: нередко пользователи меняют устройства на более новые и функциональные каждые 1–2 года. Остаётся загадкой и то, насколько потребители готовы к использованию «карманного ядерного реактора», несмотря на гарантии безопасности.

Предпосылки к созданию миниатюрного, пусть пока и маломощного, ядерного энергетического модуля известны ещё в XX веке, когда учёные СССР и США разработали электронную технологию для использования в космических кораблях, подводных системах и удалённых научных модулях-станциях, однако термоядерные батареи позиционировались как дорогостоящие и громоздкие. Стремление к миниатюризации и коммерциализации ядерных батарей предпринято в рамках 14-го пятилетнего плана Китая, призванного укрепить экономику страны в период 2021–2025 гг. Надо отметить, что научные коллективы в США и Европе также работают над разработкой подобных батарей. В пресс-релизе сообщается, что новая энергетическая инновация поможет

Китаю получить преимущество в новом раунде технологической революции искусственного интеллекта [6]. Пока новейшая разработка находится на стадии пилотных испытаний, создатели первой портативной ядерной батареи утверждают, что будут работать над созданием к началу 2025 года аккумуляторной батареи мощностью 1 Вт.

Применение нетрадиционных источников питания в качестве селективно излучающих систем в инфракрасном диапазоне позволяет увеличить эффективность их работы, ибо часть энергии безвозвратно превращается в тепловую. Был создан прототип автономного радиоизотопного источника питания средней мощности на основе узкозонных полупроводниковых термофотовольтаических материалов с КПД преобразования теплового излучения (ближнего ИК-диапазона) не ниже 15%. Это более чем в 2 раза превосходит КПД преобразования радиоизотопных источников питания, выполненных по технологии радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ). Также было проведено исследование технических характеристик прототипа, разработан комплект конструкторской документации для масштабирования, отработана технология преобразования тепловой энергии ядерного распада в электричество с помощью термофотовольтаических преобразователей, позволяющих работать в ближнем ИК-диапазоне. Такие же разработки в настоящее время активно ведутся в США и Европе для аппаратов исследования космоса. Увеличение КПД солнечных элементов питания посредством использования термофотовольтаических материалов – новый импульс к совершенствованию ядерных батарей. Поэтому путь создания высокоэффективных радиоизотопных источников энергии представляет собой поиск новых или модифицированных материалов, по своим полупроводниковым свойствам способных заменить кремний, германий и другие узкозонные полупроводники.

### Источник питания на плутонии-238

Созданный в Национальном исследовательском ядерном университете (НИЯУ) «МИФИ» прототип источника электроэнергии на плутонии-238 мало похож на пальчиковые батарейки или аккумуляторы мобильных теле-

фонов. Это состоящее из нескольких технологических слоёв 30-килограммовое устройство с многочисленными разъёмами [4].

На рис. 3 представлен внешний вид лабораторного источника электроэнергии в НИЯУ «МИФИ».

Стремление к тому, чтобы добиться крайне продолжительной работы данного источника, прямо связано с предназначением и условиями эксплуатации рассматриваемых нетипичных электрических батарей.

### Предназначение и условия эксплуатации изотопных батарей

Рассматриваемые изотопные батареи решают множество проблем для расположенных в отдалённых районах потребителей, к примеру, в датчиках телеметрии для нефте- и газопроводов, ибо ядерные электрические батареи могут работать без подзарядки несколько десятков лет там, где условия эксплуатации очень суровы, включая условия с нетипичным температурным режимом до  $-100^{\circ}\text{C}$ , когда стандартные автономные источники питания устойчиво работать не могут или их энергоёмкость существенно снижается. В пример уместно привести автономные метеопосты на территории Крайнего Севера, створные навигационные знаки и в целом оборудование гидрографических станций, оборудование световых «маяков» для ориентации судов, находящихся в море, в том числе на наземных объектах вдоль трассы Северного морского пути, а также космические спутники. Разумеется, сфера применения ядерных батарей не ограничивается приведёнными выше примерами. Так, при установке в качестве источников питания с мощностью даже 5–10 Вт на удалённые и необслуживаемые оператором (обслуживаемые дистанционно) метеостанции, предназначенные для передачи информации о погоде на Большую землю посредством телеметрии, удастся добиться более точных прогнозов. Это возможно в том числе из-за стабильного автономного питания удалённых зондов, для которых изотопные батареи будут дополнительным фактором стабилизации питания в комплексе с источниками возобновляемых источников энергии ветра (ветрогенераторы) и солнца (солнечные панели и преобразователи в электрический ток).

### Долговечность и принцип работы изотопных батарей

Чем больше период полураспада активного изотопа, тем больший ресурс имеет источник питания на его основе. Вот почему так важны характеристики материалов: к примеру, период полураспада тория-228 составляет 2 года, а америция-241 – около 400 лет. Выбранный плутоний-238 – элемент с 87-летним периодом полураспада. Гарантированный срок службы изделий обозначен разработчиками в 30 лет. Как и в любом «рукотворном» устройстве со сложными элементами, в том числе в РЭА, отдельные элементы изделия неравномерно сохраняют свойства, а общая надёжность зависит от расчёта «наработки до отказа» самых нестабильных компонентов. Поэтому в расчётах долговременности эксплуатации учитываются риски разрушения проводников (в том числе с алмазным напылением), деградация поверхности и кристаллов фотоэлементов, возможная потеря вакуума в капсуле. При нарушении целостности оболочки и корпуса изотопный источник автономного питания можно переместить в новую оболочку, и сохранённая энергия обеспечит разность потенциалов на полюсах. Таким образом, теоретически ядро, если оно сохранено, можно использовать и далее в других источниках питания РЭА.

Но вот что крайне важно: чем меньше живёт активный изотоп, тем выше (при одинаковой энергии распада и прочих равных условиях) его энергоёмкость и отдаваемая в нагрузку полезная мощность. Как мы отметили выше, изотопный источник тока практически лишён эффекта саморазряда, так как реакция происходит только при наличии «внутреннего тока» и ЭДС, связанной с подключением внешней нагрузки.

Применяемый в плутониевой электрической батарее принцип преобразования энергии ядерного распада в электрическую называют термофотоэлектрическим [4]. Альфа-источник окружён вакуумной капсулой, внешние стенки которой покрыты слоем наночастиц. Тепло от ионизирующего излучения нагревает капсулу до 1500 К, заставляя её поверхность светиться. Чувствительные и адаптированные к среде фотоэлементы, окружающие капсулу и способные выдерживать колоссальный нагрев окружающей темпе-

ратуры, улавливают эти изменения спектра. В принципе работы изделий особенности фотогенерации: образование подвижных электронов и дырок при поглощении квантов света, в том числе в органических полупроводниках с изменениями от освещённости и температуры. Это знание способствует созданию разных устройств в сегменте органической фотовольтаики, таких как солнечные панели и батареи. Перенос заряда и энергии в конденсатах квантовых точек описан довольно давно [3, 5]. Однако с появлением изотопных источников тока задача моделирования транспорта носителей заряда, необходимого для оптимизации характеристик оптоэлектронных устройств на основе квантовых точек, решается лучше.

### Наногибридные материалы

Неупорядоченные органические полупроводники применяются в РЭА даже в производстве кристаллов светодиодов. Активно исследуются возможности применения в тонкоплёночных транзисторах, фотовольтаике, сенсорах и др. Преимущества неупорядоченных органических полупроводников перед другими материалами – гибкость, лёгкость, разнообразие свойств и возможность производства по дешёвой массовой технологии. В связи с относительно малой величиной диэлектрической проницаемости поглощение фотона приводит к образованию пар, в которых электрон и дырка разделены в пространстве, но связаны кулоновским взаимодействием (геминальные пары). Вероятность полного разделения геминальной пары определяет фотогенерацию свободных носителей заряда: «электронов» и «дырок». Вот почему увеличение эффективности фотогенерации важно для развития устройств органической фотовольтаики и, в частности, солнечных элементов. Разъяснение феномена и предтечи открытий связано с физическими свойствами наногибридных материалов. Изготовление конденсатов квантовых точек производится доступными методами, но для получения качественного покрытия необходимо тщательно соблюдать технологию и условия изготовления, а также выбирать тип органических молекул, «сшивающих» квантовые точки между собой [5]. Возможность замены лигандов позволяет менять расстояние между квантовыми точками и оптимизировать перенос

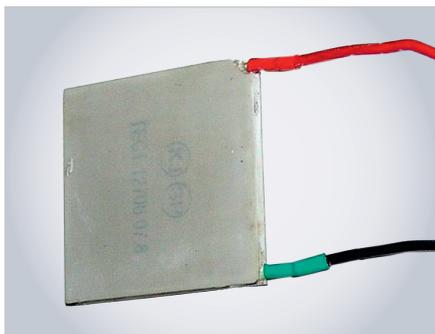


Рис. 4. Внешний вид маломощного элемента Пельтье

энергии и заряда. Технология замены лигандов при комнатной температуре облегчает данный процесс, а наногибридные материалы с квантовыми точками разработчики РЭА используют не только для создания фотовольтаических элементов или светодиодов, но и для сложных полупроводниковых структур как основы новейших высокочувствительных сенсоров.

### РИТЭГ и специальные элементы питания

Предтечей новых разработок был запущенный в серийное производство в СССР радиоизотопный термоэлектрический генератор РИТЭГ. Он работал на бета-частицах стронция-90 по термоэлектрическому принципу, почти как термопара: между холодным и разогретым от активного источника полюсами-контактами возникала разность потенциалов (напряжение), при подключении нагрузки создавалась классическая электрическая цепь с постоянным родом тока. Интересно, что для безопасной утилизации последних РИТЭГов с автономных антарктических метеопостов в 2015 году снаряжали полярную миссию. Пока же необслуживаемые метеостанции в труднодоступных районах питают электроэнергией от возобновляемых источников ветра и солнца.

### КПД и перспективы изделий

Коэффициент полезного действия РИТЭГ не превышал 6%. В рассматриваемом прототипе изотопной батареи он в 2,5 раза больше. Специальные термо-фотоэлементы, преобразующие свет ближнего диапазона ИК-спектра в электрический ток, дают такой эффект, что энергии тратится меньше [4]. Можно сказать, батарея «сама себя экономит» и является аккумулятором для своей же энергии. На рис. 3 показаны



Рис. 5. Пробраз современной электрической батареи

разъёмы, которые свидетельствуют об экспериментальном образце и продолжающихся исследованиях и тестах – для метрологического замера разных характеристик изделия. Теплопроводность в сердцевине изделия отсутствует, а в перспективе добиваются, чтобы максимум возможной энергии альфа-распада переходил в излучение. Притом что нормальное атмосферное давление чуть больше значения 1 бар, в рабочей камере изделия надо добиться давления внутри примерно в 1/1 000 000 (одну миллионную) миллибара. Нагрев рабочей зоны капсулы имитирует ТЭН, поэтому вакуум в рабочей камере нужен для исключения конвекционных потерь.

По теме РИТЭГ уместно вспомнить, что тепло, как неизменный спутник процесса радиоактивного распада, уже является условием возникновения электрического тока после соответствующего преобразования. Для иллюстрации этого тезиса уместно вспомнить принцип работы элементов Пельтье; кроме прочего, ими комплектуются электронные устройства охлаждения: кулеры, пурификаеры и др. На рис. 4 представлен внешний вид маломощного элемента Пельтье.

### Из истории автономных элементов питания

История автономных элементов питания по-своему любопытна. Древняя багдадская (она же парфянская) электрическая батарея была похожа на глиняный горшок, внутрь которого вставлен и зафиксирован полый цилиндр из меди. По центру, так, чтобы тот не соприкасался со стенками трубы, установлен металлический (железный) стержень. Конструкция закрывалась пробкой из битумной смолы. Внешний вид старинной парфян-

ской электрической батареи представлен на рис. 5.

Подобных артефактов при раскопках найдено несколько. Местом обнаружения стало древнее поселение Худжут Рабу неподалеку от Багдада, где в 1936 году велись археологические раскопки. Возраст городища оценивается примерно в 2000 лет, оно было построено в Парфянскую эпоху предположительно между 250 г. до н. э. и 224 г. н. э. Согласно предположению немецкого археолога Вильгельма Кенига, выдвинутому в 1938 году, предназначение сосуда было тем же, что у современного электрического аккумулятора. За загадочным артефактом прочно закрепилось название «багдадская батарейка». Вероятность гипотезы подтверждена экспериментами, проведенными после Второй мировой войны Уиллардом Греем, исследователем компании «Дженерал Электрик». Исследователь соорудил копию предполагаемой батарейки; после наполнения её электролитом Грей выяснил, что устройство является источником электрического тока с напряжением примерно 2 В [2]. Если это действительно так, то древние люди вполне могли пользоваться источниками питания с существенно более высоким напряжением, если включали подобные сосуды в последовательную электрическую цепь и извлекали из неё, к примеру, 220 В.

Что касается альтернативных электрических батарей, работающих по принципу химической реакции, уместно вспомнить и такой вид химических источников тока, как батареи для акваторий. Пример подобной электрической батареи представлен на рис. 6.

Одними из особенных и заслуживающих внимания химических источников тока являются специальные водоакти-

вируемые батареи. Сухие законсервированные и герметично упакованные в целлофановую плёнку батареи способны обеспечить в электрической цепи ток 2–10 А (зависит от типа батареи) при заполнении резервуара водой. Главное их назначение – морские и речные (озёрные) устройства навигации, сигнализации, освещения и спасения. Химические источники питания, работающие под воздействием воды, предназначены производителями для всех подходящих случаев, например, для огней спасательных жилетов (к примеру, ЖСМ), светящихся буюв (БС-2), спасательных плотов, огней поиска (ЭОСС-98ПВ) и самозажигающихся огней спасательных кругов. К примеру, буй БСД-02 (буй светодымящий аварийный) предназначен для обнаружения спасательного круга как в ночное, так и в дневное время за счёт подачи светового и оранжевого дымового сигналов. Он состоит из поплавка и корпуса, в котором размещён водоактивируемый источник питания (приводится в действие автоматически при падении в воду) и дымящий состав. Такие источники разных моделей, фирм и годов выпуска, но действующие (активирующиеся) по единому принципу, подходят и для электропитания элементов плавсредств, а также буюв. Активация происходит автоматически после того, как внутренний резервуар устройства заполняется водой и происходит химическая реакция. Перед этим электрохимический источник тока, предварительно подключённый к электронному устройству (РЭА) нагрузки, освобождают от пробки-заглушки и помещают (бросают) в воду.

### Внутренняя начинка водоактивируемых батарей

При производстве на лист магния толщиной 1,4...2 мм (объёмный пористый электрод из металлического магния марки МА2 или МА8) напрессовывают хлорид в смеси с проводящими ток (графит) и связующими (бутилкаучук, целлюлоза, декстрин) добавками. Хлоридный электролит пропитывает целлюлозные (стекловолоконные) сепараторы и высушивается. Батарея хранится в целлофановой, приближенной к вакууму, упаковке длительное время. При поступлении воды химсостав батареи реагирует, и между двумя противоположными полюсами (через несколько минут после воздействия воды с темпера-

турой +1...+40°C) появляется разница потенциалов. Напряжение между полюсами элемента не превышает 6 В (в разных ХИТ), но ток, отдаваемый в нагрузку, существенен. Он может достигать нескольких ампер в течение 10–30 мин, а ток короткого замыкания – порядка 8–10 А. Один из примеров – батарея типа «Дымок», фото которой представлено на рис. 6.

### Осуществление постоянного дистанционного контроля

Рассмотренные изотопные источники питания в антивандальных (и безопасных) для флоры и фауны соответствующей местности контейнерах будут оснащены комплексом удалённого контроля местоположения и фиксации параметров окружающей среды, в том числе радиационного фона. Такой контроль посредством современных телекоммуникационных систем позволит минимизировать риски техногенной катастрофы, сохранять окружающую среду и обеспечивать безопасность для людей, животных и в целом природы на высоком уровне.

Утилизации и безопасности изделия также уделено внимание. Динамика разгона альфа-частиц плутония-238 существенно меньше толщины стенок внутренней капсулы, а внешние стенки корпуса устройства со свинцовым экраном являются надёжной преградой для радиации. По истечении срока службы батарею будут утилизировать, а ядерный компонент изымать и хоронить в рекреационных зонах согласно плану утилизации ядерных отходов.

### Выводы

Разработки в области ядерных источников питания малой мощности имеют высокий приоритет согласно Единому отраслевому тематическому плану научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) корпорации «Росатом» [7]. Оригинальный альтернативный подход к решению проблемы преобразования энергии ядерного распада в электричество и реализация соответствующей программы позволят совершенствовать процесс преобразования энергии во всём объёме материала. А увеличение эффективности и КПД системы открывает поистине космические возможности масштабирования элементов для получения большей мощности источников питания при их миниатюризации. Это ведёт к созданию в будущем



Рис. 6. Электрохимический источник тока для питания световых и звуковых сигналов на воде

ядерных батарей с энергоёмкостью до сотни кВт. Ожидается, что к 2030 году в промышленной сфере будут внедрены проверенные продукты для накопления и хранения энергии, обеспечивающие сотни ватт и имеющие разный срок службы.

### Литература

1. Второй саммит Россия – Африка: перспективы развития // URL: [https://www.cta.ru/news/soel/2023/vtoroy\\_sammit\\_rossiya\\_afrika\\_perspektivy\\_razvitiya\\_sovremennoy\\_elektroniki/](https://www.cta.ru/news/soel/2023/vtoroy_sammit_rossiya_afrika_perspektivy_razvitiya_sovremennoy_elektroniki/).
2. Изобретения инженеров древности // URL: <https://www.weekly-news.info/single-post/2017/12/28/%D0%98%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%B8%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2-%D0%B4%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8>.
3. Кашкаров А.П. Фото- и термодатчики в электронных схемах. М.: Альтекс, 2004. 212 с., ил.
4. НИЯУ «МИФИ» разработал ядерную батарею на плутонии-238 // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/09/13/138696>.
5. Повышение эффективности солнечных батарей // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/10/18/139777>.
6. Пресс-релиз фирмы Betavolt (КНР). Nuclear battery produces power for 50 years without needing to charge // URL: <https://www.independent.co.uk/tech/nuclear-battery-betavolt-atomic-china-b2476979.html>.
7. Прототип радиоизотопной батареи средней мощности на основе никеля-63 // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/02/01/132411>.

