

## РАДИОИЗОТОПНАЯ БАТАРЕЯ НОВОГО ТИПА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Вячеслав Балебанов, Николай Ерохин

Институт космических исследований – Российская академия наук  
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

## NEW TYPE OF SECONDARY EMISSION RADIOISOTOPE BATTERY FOR SPACE APPLICATIONS

Vyacheslav Balebanov, Nikolay Erokhin

Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

**Ключевые слова:** Вторичная электронная эмиссия, радиоизотопная батарея, токовая ячейка, преобразование ядерной энергии в электрическую, слой эмиссии, вольт-амперная характеристика, сверхтепловые электроны, энергетический спектр, активный изотопный слой, пленки

**Key words:** Secondary electron emission, radioisotope battery, current cell, conversion of nuclear energy to electric one, emission layer, volt-ampere characteristic, suprathreshold electrons, energy spectrum, active isotope layer, films

**Аннотация:** Рассмотрены физические основы нового типа атомных батарей – компактные вторично-эмиссионные радиоизотопные источники тока, которые могут иметь многочисленные приложения, например, для использования на космических аппаратах. По теоретическим оценкам в данной батарее к.п.д. преобразования ядерной энергии в электрическую может быть очень высоким вплоть до 30 %. Кроме того она имеет по сравнению с традиционными источниками тока преимущества по весу, габаритам, рабочей температуре и безопасности в эксплуатации. Для производства таких батарей необходимо отработать новые технологии изготовления сотен токовых ячеек, содержащих металлические и диэлектрические пленки с толщинами слоев порядка десятков нанометров.

**Abstract:** It is considered the physical background of new type of atomic batteries – compact secondary emission radioisotope source of current which will have a number of various applications, for example, for usage at space devices. According to theoretical estimates, in this source of current the efficiency of the nuclear energy conversion to electric one may be very high, up to 30 %. Moreover, such battery will have advantages in the comparison with conventional one on the weight, sizes, the working temperature and on the safety in exploitation. For manufacturing this battery it is necessary to elaborate the new technology to produce hundreds current cells. Each current cell must contain metallic films and dielectric ones with film thickness about tens nanometers.

### Введение

Существующие компактные источники электроэнергии в ряде приложений не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям вследствие следующих причин - низкого КПД, недостаточного срока службы, высоких рабочих температур либо по соображениям экологической безопасности. Поэтому возникает настоятельная необходимость в создании принципиально нового компактного источника электроэнергии, мощность которого могла бы колебаться от мкВт, в случае источников для медицинских целей, до кВт при использовании в энергосистемах космических станций.

Проведенные научными группами в ННЦ ХФТИ (Харьков) и ИКИ РАН (Москва) разработки позволяют предложить для реализации новый тип батареи - вторично-эмиссионный радиоизотопный источник тока (ВЭРИИТ), основанный на неравновесной эмиссии сверхтепловых электронов. Этот процесс возможен при прохождении через тонкие металлические пленки быстрых ионов, например,  $\alpha$ -частиц радиационного распада изотопов трансурановых элементов. За счет прямого преобразования ядерной энергии в электрическую ВЭРИИТ-источники тока будут иметь повышенный КПД. Они могут работать в экстремальных условиях, в частности, как система миниатюрных батарей для целей бортового питания космических аппаратов (КА), в труднодоступных районах Земли, в качестве экологически чистых источников энергии для кардиостимуляторов, в микроэлектронике и др.

В указанных приложениях они будут иметь лучшие рабочие характеристики, в частности, по эффективности, удельной энергоемкости, сроку службы по сравнению с существующими атомными батареями. Изготовление новых источников электроэнергии даст также стимул для развития технологий 21 века в области производства многослойных электрических структур из тонких металлических и диэлектрических пленок. Помимо упомянутых выше, ВЭРИИТ-батарея будет иметь следующие преимущества по сравнению с существующими радиоизотопными батареями: нет необходимости в высоких температурах; низкое рабочее напряжение, высокий к.п.д. преобразования кинетической энергии  $\alpha$ -частиц в электричество; ВЭРИИТ взрыво и пожаро безопасен.

### Физические основы батарей ВЭРИИТ

В основе работы батареи ВЭРИИТ заложено использование неравновесных, степенеподобных распределений энергичных, заряженных частиц. Образование мощного хвоста сверхтепловых электронов, порождаемых ионизацией вещества эмиттера батареи осколками деления радиоизотопов, летящих из изотопного слоя, позволяет весьма эффективно преобразовывать кинетическую энергию этих осколков в электрическую. Кроме того, как показали харьковские эксперименты, при указанных условиях происходит существенное увеличение вторичной эмиссии электронов из металлических и диэлектрических пленок.

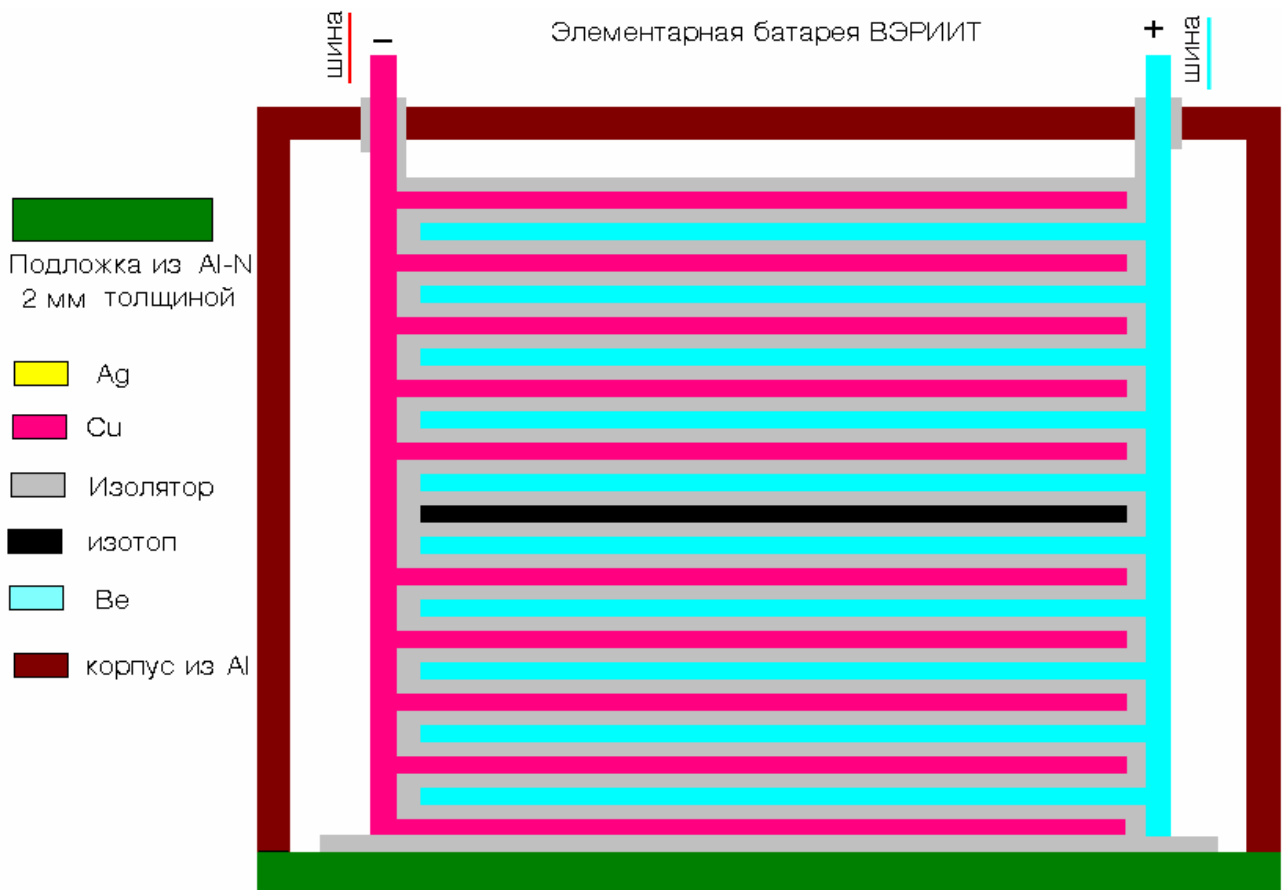
Физическая схема реализации ВЭРИИТ состоит в следующем : быстрые альфа-частицы от изотопного слоя, проходя систему бинарных токовых ячеек, содержащих четыре пленки каждая, порождают ионизацию вещества пленок. За счет разницы в коэффициентах вторичной электронной эмиссии ( ВЭЭ ) из пленок бинарной ячейки имеет место зарядка слоев друг относительно друга до некоторого потенциала, определяемого характерной энергией эмиттирующих электронов. Параллельное соединение бинарных ячеек умножает ток в системе с нагрузкой. Предварительные теоретические оценки участников этих работ и проработка технологических возможностей реализации прибора показывают, что можно создать источник с высоким к.п.д. (порядка 10 % и более), с удельной энергоемкостью порядка 1кВт/кг. В качестве материала пленок бинарной ячейки могут служить медь и бериллий с коэффициентами вторичной эмиссии из одной пленки соответственно 5 и 30 электронов на одну альфа-частицу. К.п.д преобразования возрастает с увеличением числа бинарных ячеек, размещаемых на длине пробега быстрых ионов. Оптимальная толщина каждой металлической пленки должна быть равна эффективной толщине слоя эмиссии.

Первый этап работ должен состоять в создании демонстрационного образца ВЭРИИТ. Это позволит реализовать технологию изготовления бинарных ячеек с внедренной радиоизотопной прослойкой, исследовать к.п.д. и другие параметры источника, оценить реальные конструкционные характеристики и выработать практические рекомендации по созданию экспериментального образца ВЭРИИТ на большие мощности (порядка ватта). На рис. 1 представлена схема данной батареи.

Приведем ориентировочные параметры демонстрационного образца ВЭРИИТ на основе изотопа полония  $^{210}\text{Po}$ , включающего один слой изотопа: 1) масса изотопа  $m_i = 0,1$  мг ; 2) толщина изотопного слоя  $l_i = 0,01$  мкм; 3) площадь изотопного слоя  $S_i = 10$  см<sup>2</sup> . Активность изотопного слоя будет равна  $Q_i = 1,11 \times 10^9$  ( $\alpha$ -частиц/сек ). При этом электрическая мощность демонстрационного образца, при к.п.д. преобразования в 1%, будет равна  $P_{\text{elec}} = 89$  мкВт. Напряжение батареи определяется характерной энергией эмиттирующих электронов и ожидается порядка 15 В.

Одна бинарная токовая ячейка батареи состоит из 4-х пленок изолятор-медь-изолятор-бериллий (в качестве изолятора может служить, например, керамика). Каждая пленка имеет толщину  $l_{\text{Cu}} = 0,1$  мкм т.е. полная толщина бинарной ячейки  $l_{\text{бя}} = 0,4$  мкм. С одной стороны от изотопного слоя на длине пробега  $\alpha$ -частиц уложится 25 бинарных ячеек т.е. с обеих сторон - 50 штук. Расположение ячеек показано на рис. 1. Без радиационной защиты полная толщина комплекта составляет 20 мкм, масса не более 140 мг. Удельное тепловыделение в бинарных ячейках будет  $P_{\text{тепл}} = 0,44$  Вт/см<sup>3</sup>. Ожидаемый поток  $\alpha$ -частиц порядка 0.5 част./см<sup>3</sup>. Для достижения электрической мощности в 1 мВт необходимо 13 таких комплектов с общей массой изотопа  $M_i = 1,3$  мг.

Принципиальным отличием предлагаемого ИЭ от термоэмиссионных является использование тонких ( $l_{\text{Cu}} < 0.1$  мкм) металлических пленок. Благодаря этому, происходит существенное повышение преобразование энергии налетающих  $\alpha$ -частиц в электрическую энергию за счет увеличения числа электронов эмитируемых с поверхности пленки.



**Рис. 1.** Конструктивная схема эмиттера батареи ВЭРИИТ

При расчетах характеристик ВЭРИИТ необходимо знать эффективную тормозную способность эмиттера, содержащего тонкие пленки из различных материалов. На рис. 2 даны графики тормозной способности в случае токовой ячейки из пленок золота и серебра (аналитические аппроксимации экспериментальных данных). Затем на рис. 3 показана вычисленная эффективная тормозная способность эмиттера батареи, состоящего из тонких пленок алюминия и серебра равной толщины (аналитическая аппроксимация). При этом эффективный пробег альфа-частиц в эмиттере показан на рис. 4 (аналитическая аппроксимация). В частности, для начальной энергии альфа-частицы 5,3 МэВ ее пробег в таком эмиттере составляет 13,7 мкм.

Затем проводилось также моделирование вольт-амперной характеристики радиоизотопной, вторично-эмиссионной батареи с учетом внешней нагрузки с сопротивлением  $R$  при заданном потоке быстрых ионов через эмиттер  $J_\alpha$  (част/с) для числа токовых ячеек эмиттера  $N_b$  при характерной энергии эмиттированных электронов  $\varepsilon_c$  ( $e$  заряд электрона).

По результатам проведенных расчетов на рис. 5 представлены графики (в нормированных величинах) рабочего напряжения (для одной ячейки батареи)  $u$ , тока в нагрузке  $\mu \cdot u_m(\mu)$  и выделяемой в нагрузке мощности  $\mu \cdot [u_m(\mu)]^2$  в зависимости от величины безразмерного параметра нагрузки  $\mu = (\varepsilon_c / e^2 R J_\alpha N_b)$ , который обратно пропорционален ее сопротивлению. В расчетах полагалось  $\Delta = 10$ , где  $\Delta$  – полный выход вторичной электронной эмиссии из одной бинарной ячейки в расчете на одну проходящую через ячейку альфа-частицу.

Были проведены также численные расчеты зависимости нормированного тока в нагрузке  $\mu \cdot u_m(\mu)$  от нормированного рабочего напряжения  $u_m$ . Результат представлен на рис.6.

В случае выбора  $\Delta = 6$  численными расчетами определены зависимости характеристик батареи, а именно, рабочего напряжения, тока в нагрузке и выделяемой в ней мощности от параметра нагрузки  $\mu$ . Результаты аналогичны изложенным выше.

Как видно из полученных графиков, в рассмотренной модели с ростом сопротивления нагрузки рабочий потенциал возрастает, однако ток и выделяемая в ней мощность убывают.

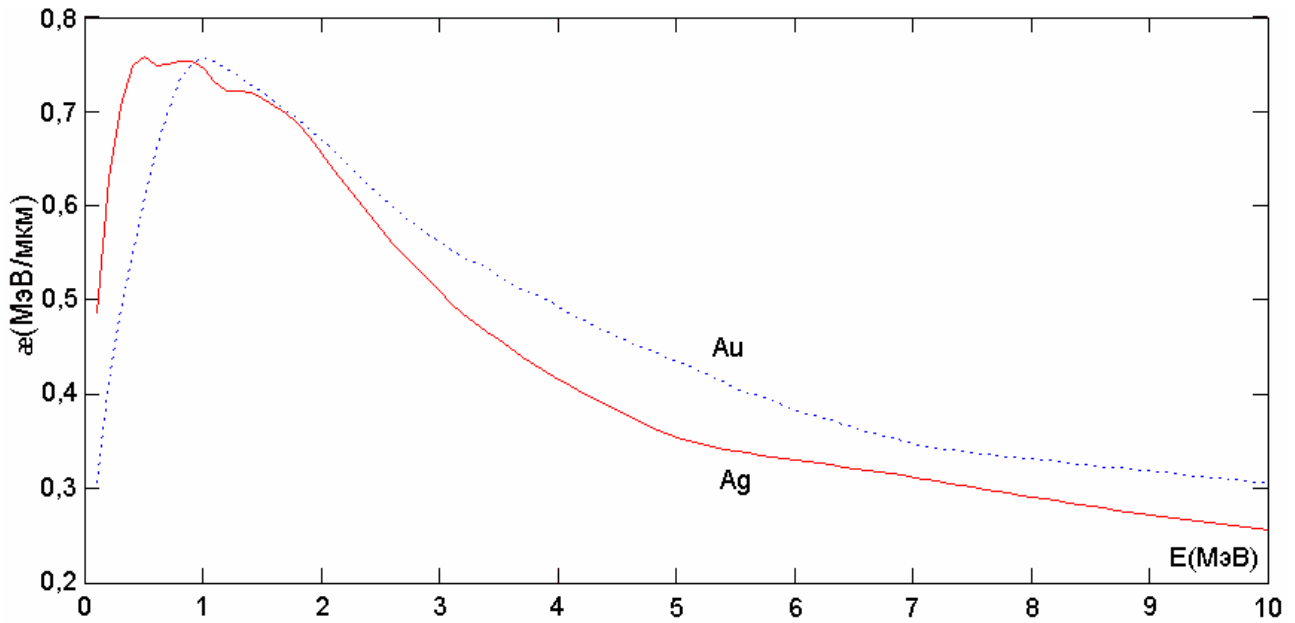


Рис. 2. Тормозные способности алюминия и серебра для альфа-частиц

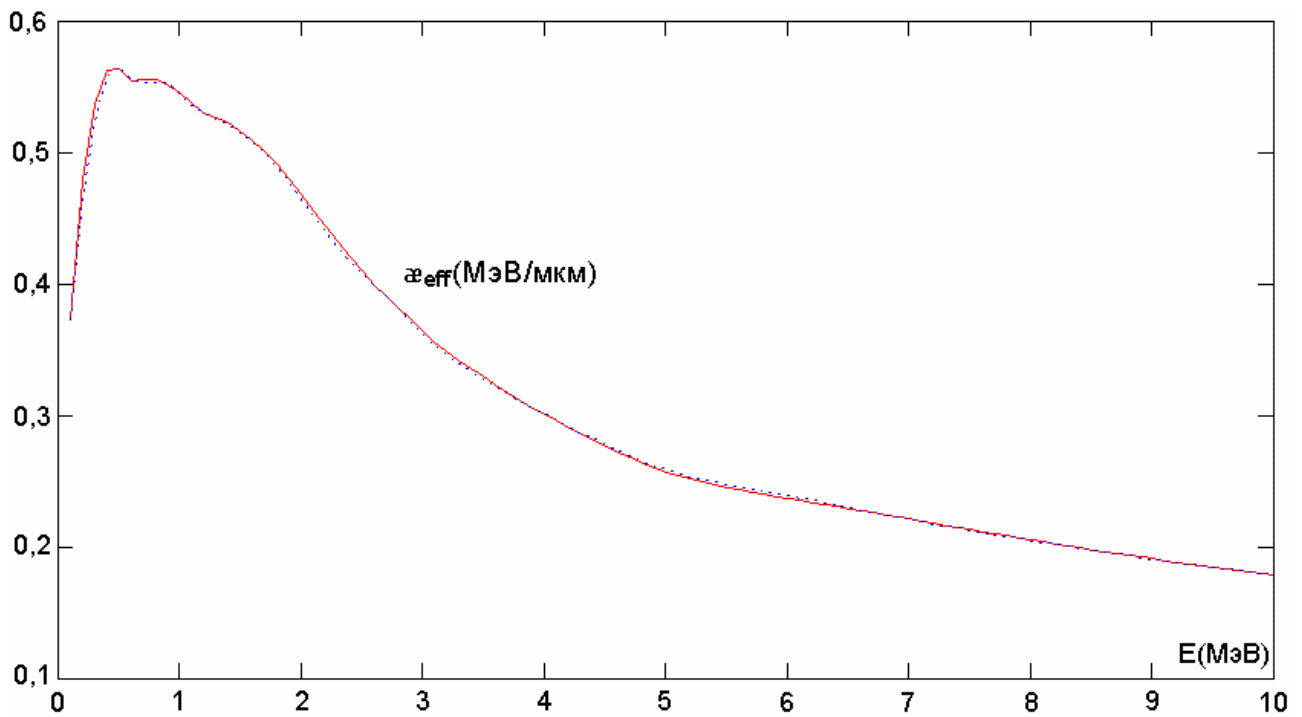


Рис. 3. Эффективная тормозная способность эмиттера батареи из алюминия и серебра для альфа-частиц

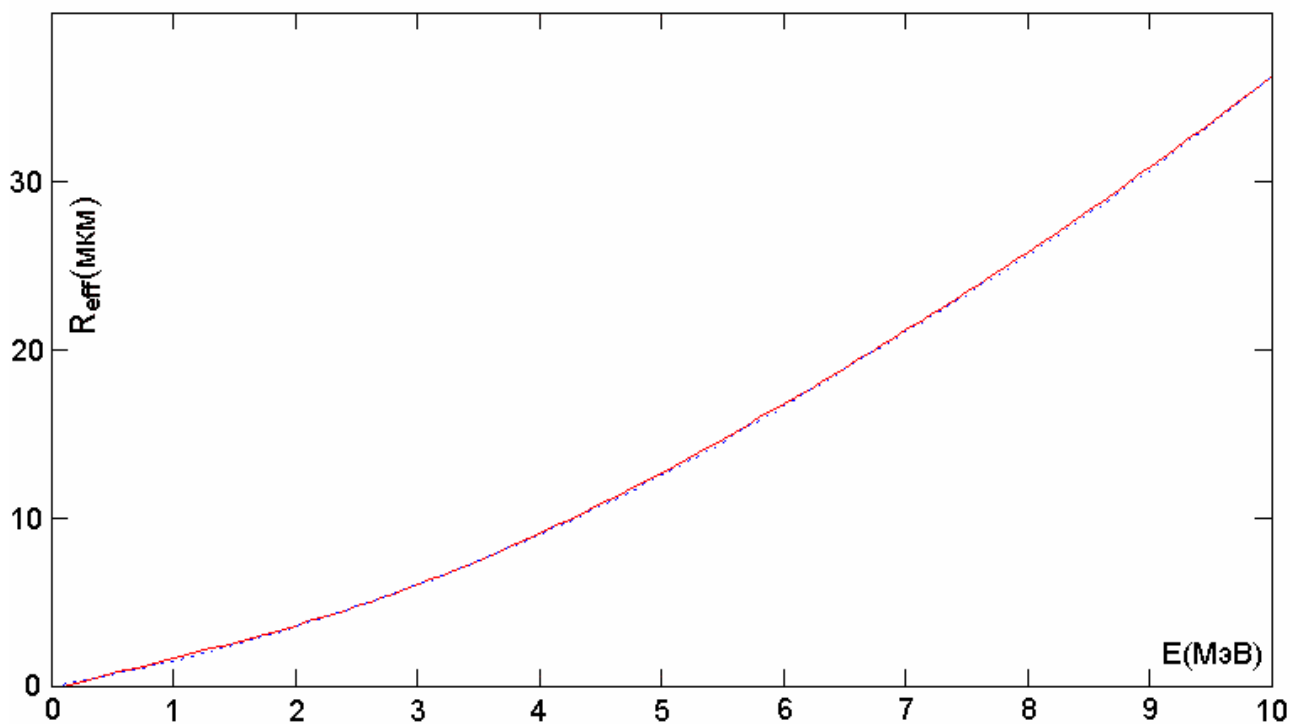


Рис. 4. Зависимость пробега альфа-частицы в эмиттере батареи от ее энергии

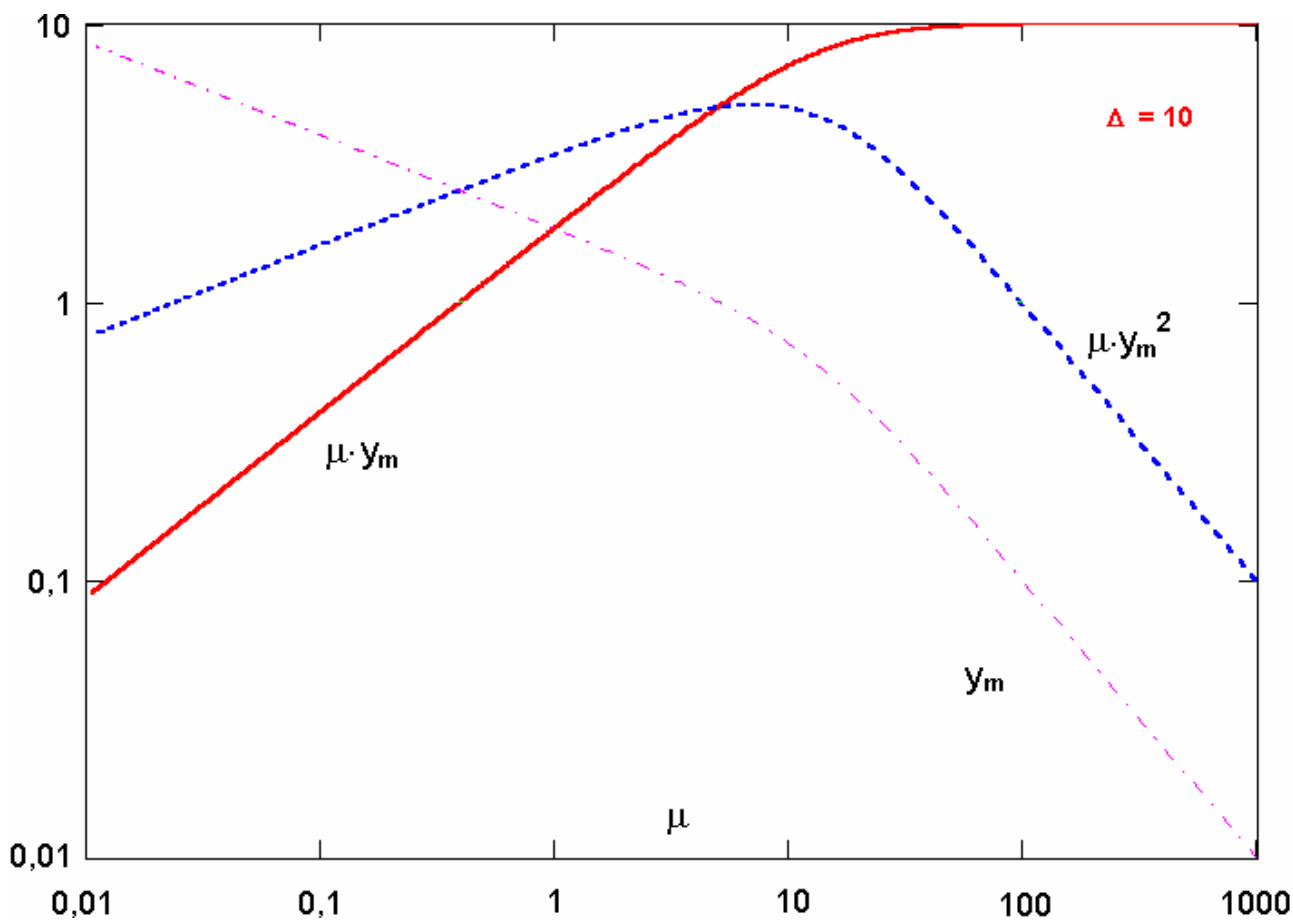


Рис. 5. Графики рабочего напряжения, тока в нагрузке и выделяемой мощности от параметра  $\mu$

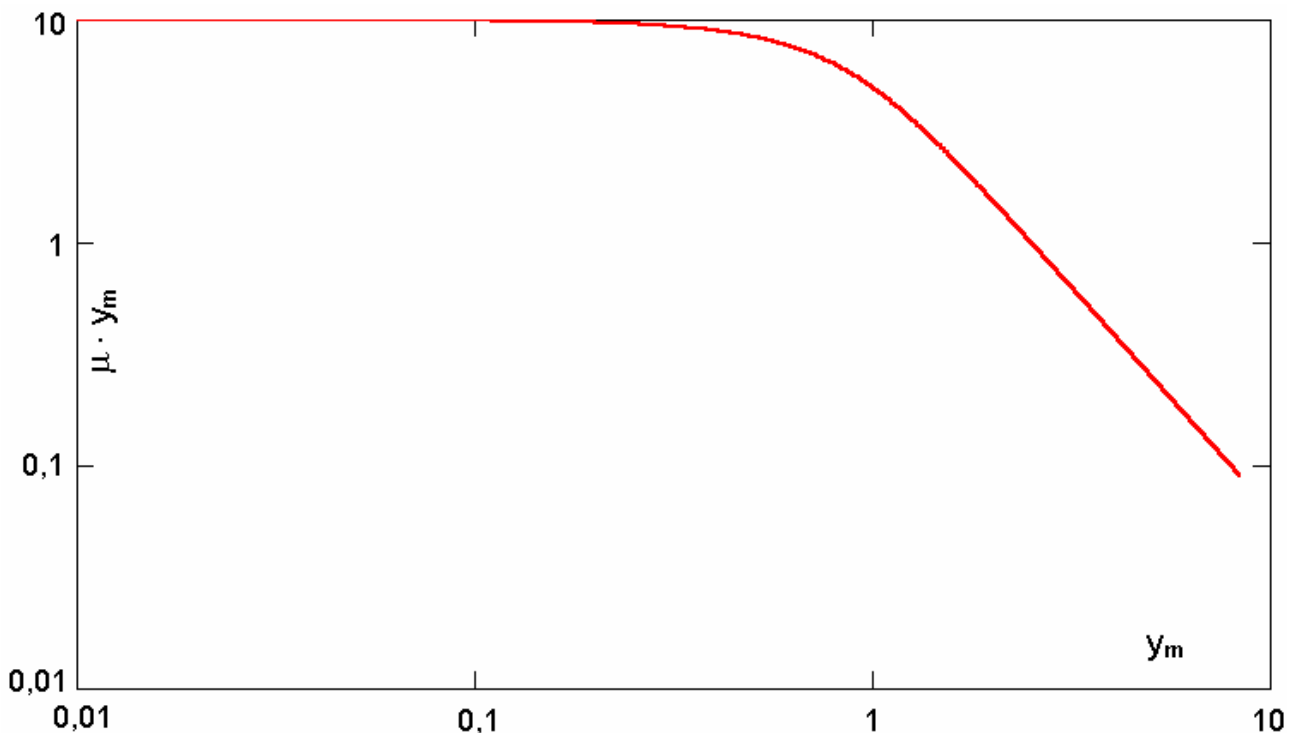


Рис. 6. Зависимости нормированного тока в нагрузке от нормированного рабочего напряжения

### Заключение

Результаты проведенного анализа в настоящей работе можно вкратце суммировать следующим образом.

1. Проведен анализ работы радиоизотопной батареи нового типа с повышенным к.п.д. прямого преобразования ядерной энергии в электрическую, которая весьма перспективна для космических и других приложений.

2. Для анализа замедления и релаксации быстрых альфа-частиц и сверхтепловых электронов в пленках разработаны аппроксимационные формулы, описывающие тормозные способности материалов эмиттера, эффективный пробег ионов гелия, среднюю длину свободного пробега вторичных электронов. Оценено максимальное число бинарных ячеек в эмиттере.

3. Рассмотрены модели вольт-амперной характеристики батареи ВЭРИИТ в том числе определены рабочее напряжение, ток насыщения и выделяемая в нагрузке мощность в зависимости от параметров системы.

4. Рассмотрены возможности увеличения тока и оптимизации рабочих характеристик вторично-эмиссионной радиоизотопной батареи.

Результаты проведенных исследований будут использованы в численном моделировании работы эмиттера, оптимизации его характеристик и выработке рекомендаций по созданию эмиттера.