**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | А | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | А3 | | | | | | |
|  | индекс факультета | |  |  | | | | |  | | | | | | индекс кафедры | | |
| Выпускающая кафедра | А3 | |  | | Бабук В.А. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  | индекс кафедры | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | А3М32 | |  | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | | | | | 20\_\_\_ г. | | |
|  | индекс группы | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **о прохождении** | | | преддипломной | | | | | | | | | | | | | | | **практики** | | | | |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Воротникова Олега Викторовича | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | 24.04.01 | | | |  | |  | | | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | код | | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | | |
| Ракетные комплексы и космонавтика | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики от БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова:** | | | | | | | Ходосов В.В., ктн, доцент | | | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики от**  **профильной организации:** | | | | | | | Остапчук А.В., инженер-конструктор 2 категории | | | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 25.02.2019 | | | | | | | г. |  | по | 02.06.2019 | | | г. |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | | **Инженер-конструктор** | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель практики от БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова:** | | | |  | |  | | **Руководитель практики от профильной организации:** | | |  | | | |
|  | |  | | Ходосов В.В. | |  | |  | |  | | | Остапчук А.В. | |
| Подпись | |  | | Фамилия ИО | |  | | Подпись | |  | | | Фамилия ИО | |
| «\_\_\_» | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 20\_\_г. | |  | | «\_\_\_» | | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | | 20\_\_г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

Оглавление

[Введение. 3](#_Toc9198051)

[Устройство РИТЭГ 4](#_Toc9198052)

[Математическая модель и результаты. 7](#_Toc9198053)

[Заключение. 10](#_Toc9198054)

[Библиографический список. 11](#_Toc9198055)

# Введение.

РИТЭГ – это маломощный автономный источник полезной электрической энергии, использующий тепловую энергию, выделяющуюся при естественном распаде радиоактивных изотопов, отличие от ядерного реактора, который использует явление цепной ядерной реакции.

Такие устройства часто устанавливаются на космические аппараты, а также машины, которые не могут эффективно получать энергию любым другим способом. К ним относятся спутники, автоматические зонды, удаленные буи и маяки и метеорологические станции.

Использование такого источника электрической энергии для автономной системы обусловлено тем, что традиционный источник электроснабжения – солнечная энергия, используемая либо на околоземных орбитах, либо во внутренней области Солнечной системы, не подходит, в связи с большой удаленностью исследуемых объектов от звезды. Плотность солнечного потока во внешней области системы недостаточна для эффективного использования солнечных батарей. Также большая автономная длительность времени работы КА не позволяет использовать системы электропитания на базе топливных элементов или аккумуляторных батарей.

Исходные данные для проектирования:

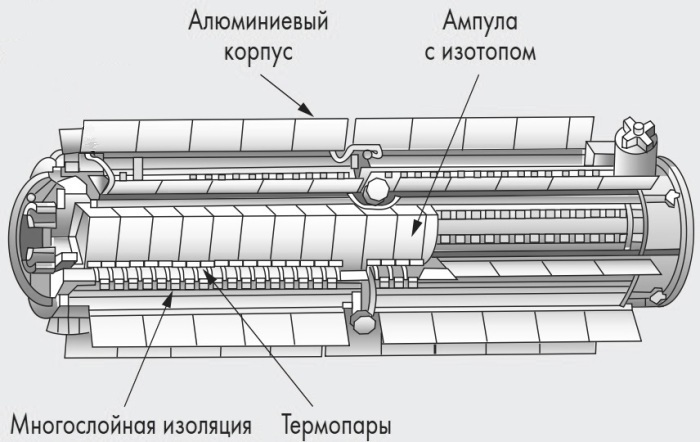
- Электрическая мощность – 200 Вт;

- Срок службы – 20 лет;

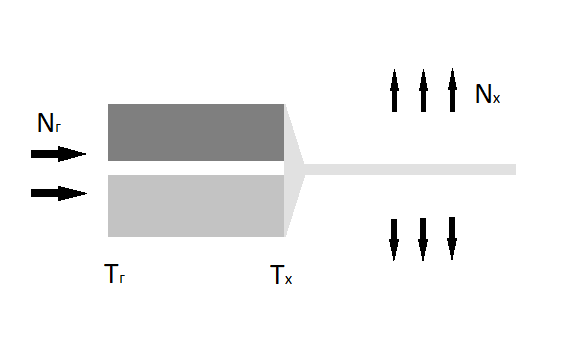
- Бортовое напряжение – 14 В.

# Устройство РИТЭГ

Любой ТЭГ состоит из трех основных частей – источник тепла, термоэлектрическоого преобразователя и холодильника. Тепло от капсулы с изотопом предается через теплопереходы на горячий спай термоэлементов, где часть тепловой энергии преобразуется в электрическую и совершает полезную работу на нагрузке. Отработанное тепло далее поступает в холодильник и сбрасывается посредством излучения в космическое пространство. На рисунке 1 представлена классическая модель ТЭГ – установка «GPHS-RTG», используемая на межпланетной станции «Кассини-Гюйгенс».

  
Рис. 1. РИТЭГ «GPHS-RTG»

Термоэлектрический преобразователь представляет из себя набор термоэлектрических батарей, соединенных между собой в последовательно-параллельную электрическую цепь. Основным элементом ТЭБ является термоэлемент, который состоит из двух термостолбиков, изготовленных из полупроводниковых материалов p- и n-проводимости. Термостолбики электрически с помощью коммутационных шин соединены между собой последовательно. Термостолбики представляют собой стержень длиной l и площадью поперечного сечения S. С боковых поверхностей ветви адиабатически теплоизолированы. Подвод и отвод тепла осуществляется с торцов (горячего и холодного спаев) термоэлемента (рис 2.).

  
Рис. 2. Распределение тепловых потоков в термоэлементе

Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую в термоэлементах основано на трех термоэлектрических эффектах: Зеебека, когда при различной температуре спаев термоэлемента возникает ЭДС, Пельтье, когда при прохождении тока на спаях выделяется или поглощается тепло и Томсона, когда при прохождении тока в проводнике выделяется помимо тепла Джоуля тепло Томсона, пропорциональное градиенту температур и силе тока.

Качество полупроводниковых материалов, используемых в термопаре, оценивается комплексным параметром – коэффициентом добротности:

 (1)

где: – коэффициент добротность материала;  – коэффициент термо-ЭДС;  – коэффициент теплопроводности;  – коэффициент электропроводности;

В действительности термоэлектрические характеристики полупроводников имеют сложную температурную зависимость, поэтому в первоначальных расчетах эти коэффициенты определяются по среднеинтегральным величинам , , . Тогда, если к горячему спаю подводится тепловой поток *Nг* при температуре *Tг*, а от холодного спая отводится тепловой поток *Nх* при температуре *Tх*, то под действием возникшего перепада температур на спаях термоэлемента *ΔT*, согласно явлению Зеебека возникает термо-ЭДС. При постоянстве свойств материалов выделение теплоты Томсона в термоэлементе отсутствует, а теплоты Пелетье и Джоуля достаточно малы по сравнению с теплом передающимся посредством теплопроводности, поэтому в первом приближении ими можно пренебречь.

Как говорилось ранее основными геометрическими параметрами термостолбиков является высота и площадь поперечного сечения. Как правило материалы ветвей термоэлементов неодинаковы. Исходя из этого определяются наиболее выгодные соотношения размеров ветвей для получения максимального значения добротности всего термоэлемента. Но из технологических и конструктивных соображений высоты ветвей термоэлемента берутся одинаковыми. Что касается оптимального отношения поперечных сечения ветвей, то максимум добротности по этой величине очень пологий и поэтому при использовании материалов близких по своим термоэлектрическим свойствам часто бывает, что термостолбики для термоэлемента делают одинакового сечения. Добротность всего термоэлемента при допущениях принятых выше находится также по формуле (1), где термо-ЭДС определяется, как сумма термо-ЭДС обоих столбиков, а удельные электропроводность и теплопроводность, как среднеарифметическое этих же величин для каждой ветви [2].

В качестве материала ветвей для исследования был выбран легированный различными добавками теллурид свинца (PbTe) p- и n-проводимости. Добротность такого термоэлемента согласно формуле (1) составляет  К-1.

Тогда приняв, что высота и площадь поперечного сечения ветвей одинаковые, максимальное значение КПД термоэлемента в зависимости от величины отношения сопротивления внешней нагрузки r внутреннему сопротивлению элемента определится через коэффициент добротности по формуле:

 (2)

где:  – температуры на горячем и холодном спае соответственно.

# Математическая модель и результаты.

Теперь запишем соотношение, которое связывает общее количество теплоты, подводимое к горячему спаю термоэлемента и разность температур на его концах:

 (3)

где:  - площадь поперечного сечения и высота термоэлемента соответственно;

Электрическая мощность термоэлемента определяется как разность подведенного и отведенного тепла:



где:  – отводимый тепловой поток;

А отводимый и подводимый тепловые потоки связаны следующим соотношением:

 (4)

Будем считать, что весь тепловой поток отводимый от холодного спая термоэлемента излучается ребром в открытый космос. Запишем уравнение для расчета количества тепла, отводимого ребром [3]:

 (5)

где: k – коэффициент теплопроводность ребра;  – длина ребра;  – толщина ребра;  – постоянная Больцмана;  – степень черноты поверхности ребра; Те – температура на конце ребра;

Температура на конце ребра определяется из следующего соотношения:

 (6)

где: B(0,3;0,5) – значение полной бета-функции; Bu(0,3;0,5) – значение неполной бета-функции; – длина ребра;  – толщина ребра;  Вт/(м2∙К4)– постоянная Стефана-Больцмана;  – степень черноты поверхности ребра; Те – температура на конце ребра;

Система уравнений (2)-(6) полностью описывает связь между геометрией термоэлемента и ребра с его электрическими параметрами. Из размеров термоэлементов и ребра можно определить их массу, а из величины подводимого теплового потока определяется необходимая масса изотопа:

 (7)

где: УТМ – удельное тепловыделение массы изотопа;

Соответственно суммарная масса, без учета остальных элементов конструкции, равна:

 (8)

где:  – плотности материала термоэлементов и ребер соответственно;

Период полураспада изотопа должен превышать срок службы КА и иметь максимально возможное УТМ. Поэтому в качестве топлива был выбран оксид плутония с УТМ=600 Вт/кг и периодом полураспада 86.4 года.

Тогда с помощью программного пакета «Maple» методом регулярного сканирования определим минимальную сумму масс термоэлементов, ребер и изотопа, используя систему (2)-(6) и варьируя геометрическими размерами: суммарной площадью поперечного сечения всех термоэлементов и их высотой, а также высотой и толщиной ребра. Зададимся, что одна из сторон термоэлемента равна 2 см. Суммарная длина термоэлементов по другой стороне определяется однозначно из площади. Суммарную длину ребер зададим равной ей. Температуру на горячем спаем зададим, как максимально возможную рабочую температуру полупроводникового материала равную 900 К. Материалом ребер выбран АМг6, а степень черноты поверхности равна 0,88. Задавшись условием, что вырабатываемая электрическая мощность должна быть не менее 200 Вт, произведем оптимизацию.

В результате получаем следующие данные:

Суммарная масса – 13,7 кг, где 6 кг – масса изотопа (выделяемый тепловой поток – 3641 Вт);

Суммарная площадь термоэлементов – 0,06 м2, высота столбиков – 7,5 мм;

Размеры ребер: высота – 13,5 см, толщина – 3,5 мм, суммарная длина 3 м.

Для того, чтобы подтвердить правильность результатов оптимизации приведены графики (рис. 3-4) изменения массы и мощности, отложенных по оси Y, от безразмерных значений варьируемых параметров, отложенных по оси X, где Δ – это отношение текущего значения к оптимальному при отклонении в «+» или «-».

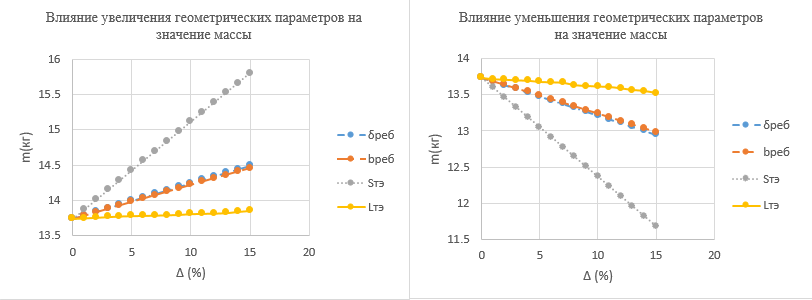


Рис. 3 – Влияние изменения геометрических размеров на значение массы

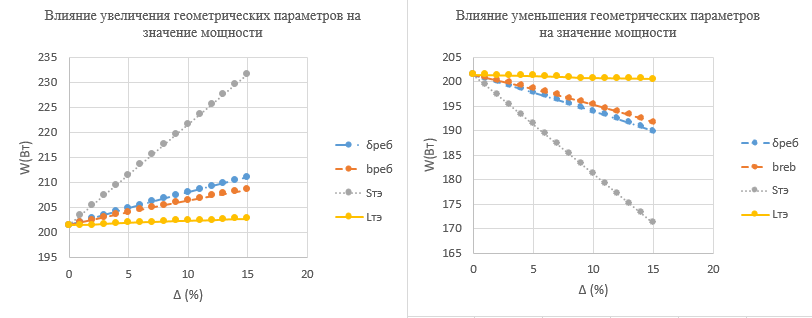


Рис. 4 – Влияние изменения геометрических размеров на значение мощности

Из графиков видно, что изменение какой-либо величины варьируемого параметра влечет за собой изменение массы или мощности в ту же сторону. Это говорит от том, что найденные значения действительно являются оптимальными, а также из графиков можно судить о влияние изменения того или иного параметра на значение массы и мощности.

Количество термоэлементов, которое будет обеспечивать требуемое бортовое напряжение будет определяться по следующей формуле [3]:

 (7)

где: U – бортовое напряжение;

Исходя из того, что требуемое напряжение составляет 14 В, а величина термо-ЭДС составляет 233 В/К, получаем что необходимо соединить 194 элемента площадью 3,1 см2 каждый.

При известных геометрических размерах термоэлементов и ребер с помощью системы уравнений (2)-(6) также можно определить выходные электрические параметры генератора на конец срока активного существования. В этом случае подводимый тепловой поток будет вычисляться по формуле:

 (8)

В результате было получено, что к окончанию срока активного существования вырабатываемая электрическая мощность составит 151 Вт.

# Заключение.

В результате проведенной оптимизации была получена геометрия радиоизотопного термоэлектрического генератора, позволяющая вырабатывать требуемые выходные электрические характеристики, в частности электрическую мощность равную 200 Вт и напряжение равное 14 В.

Результаты оптимизации:

Суммарная масса – 13,7 кг, где 6 кг – масса изотопа (выделяемый тепловой поток – 3641 Вт);

Суммарная площадь термоэлементов – 0,06 м2, высота столбиков – 7,5  мм;

Размеры ребер: высота – 13,5 см, толщина – 3,5 мм, суммарная длина 3 м.

Для обеспечения требуемого напряжения необходимо соединить 194 элемента площадью 3,1 см2 каждый. К окончанию срока активного существования вырабатываемая электрическая мощность генератором составит 151 Вт.

# Библиографический список.

1. https://rps.nasa.gov/ (дата обращения: 10.03.2019).
2. Ходосов В.В., Энергетические установки космических аппаратов: учебное пособие; БГТУ "ВОЕНМЕХ". - СПб., 2017. - 54 с. - ISBN 978-5-906920-27-0.
3. А. Г. Козлов, В. В. Ходосов; Системы электропитания космических аппаратов, БГТУ "ВОЕНМЕХ", СПб, 2011. - 105 с., ISBN 978-5-85546-599-0.
4. Охотин А. С., Ефремов А.А. и др., Термоэлектрические генераторы, М.: Атомиздат, 1971.
5. Керн Д., Краус А., Развитые поверхности теплообмена. Пера. с англ. М.: Энергия, 1977.
6. Ходосов, В.В., Математическое моделирование с использованием Matlab; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018. - 36 с.
7. Марченко О.В., Кашин А.П. и др., Методы расчета термоэлектрических генераторов, Новосибирск: Наука, 1995.