

УДК 536.5

## **Особенности использования термоэлектрических преобразователей в системах терморегулирования космического применения\***

**Н.П. Семена**

*Институт космических исследований РАН, Москва*

E-mail: semena@iki.rssi.ru

В статье представлены результаты моделирования характеристик охлаждающей системы, сочетающей элемент Пельтье с радиатором-излучателем. Несмотря на достаточно широкое использование элементов Пельтье, характеристики такой системы не исследованы, поскольку в наземных условиях такое сочетание не встречается. Необходимость изучения параметров такого комбинированного охладителя возникла в связи с тем, что подобные системы планируются к использованию для термостабилизации детекторов в перспективном космическом телескопе ART-XC, который входит в состав российско-немецкой обсерватории «Спектр-РГ» и в мониторе СПИН-X1-MBH, который будет установлен на МКС.

Моделирование показало, что охладитель, состоящий из элемента Пельтье и радиатора-излучателя, обладает рядом необычных свойств из-за возникновения сложной обратной связи между ними.

**Ключевые слова:** термоэлектрические модули, элементы Пельтье, термодинамические системы, системы обеспечения температурного режима космических аппаратов, системы термостабилизации полупроводниковых детекторов.

### **Введение**

В последнее время реализуется значительное количество научных проектов по созданию космических телескопов для различных диапазонов длин волн. Так, весьма успешно функционируют международная рентгеновская обсерватория с российским участием «Интеграл», астрономический спутник «Planck», инфракрасный телескоп «Herschel» и многие другие.

Одним из ключевых параметров, определяющих качество получаемого изображения в таких приборах, является низкий уровень (в зависимости от типа детектора от  $-120$  до  $-30$  °C) и высокая стабильность ( $\pm 0,1 \dots 1$  °C) температуры детектора.

Традиционные пассивные системы обеспечения температурного режима (СОТР) космических аппаратов, основанные на излучении генерируемого научной аппаратурой теплового потока с поверхности радиаторов-излучателей в космическое пространство, не могут в полной мере обеспечить требуемые температурные параметры. Теоретически можно охладить детектор до низкой температуры, используя излучательную СОТР, поскольку радиационная температура окружающего пространства составляет около 4 К. Но такая система становится чрезвычайно чувствительной к колебаниям тепловыделения

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ 11-02-12177-офи-м-2011).

термостабилизируемого объекта и к тепловым потокам, которые могут облучать поверхность радиатора. Поэтому высокая стабильность температуры детектора при использовании подобной системы достигается только при стабильных внешних тепловых условиях и постоянном уровне тепловыделения объекта охлаждения и неизменной излучательной способности радиатора. В реальной космической миссии одновременное выполнение всех этих условий практически неосуществимо.

Одним из наиболее распространенных методов поддержания низкой стабильной температуры детекторов в наземных условиях является использование термоэлектрического преобразователя — ТЭП (элемента Пельтье). В частности, такие преобразователи предполагается использовать для термостабилизации на заданном уровне рентгеновских детекторов в перспективных отечественных космических телескопах «ART-XC» и «МВН». При функционировании ТЭП в наземных условиях и в космосе используются различные механизмы удаления тепла с их тепловыделяющих поверхностей. Поэтому опыт наземного применения охладителей на базе ТЭП не может быть полностью распространен на охладители космического применения. По этой причине было проведено моделирование характеристик охладителей космического применения с ТЭП, в результате которого были выявлены необычные свойства таких охладителей.

В настоящей статье также проведено сравнение характеристик охладителя на базе ТЭП и радиатора-излучателя с характеристиками охладителя на базе радиатора-излучателя и нагревателя.

#### **Использование термоэлектрических преобразователей в перспективных российских космических рентгеновских приборах**

В 2013 году планируется реализовать два космических астрофизических эксперимента — «Спектр-РГ» [1] и «Монитор всего неба», в которых для стабилизации температуры полупроводниковых рентгеновских стриповых и многомодульных детекторов будут использованы охладители на базе ТЭП.

Первым по значимости является российско-немецкий проект «Спектр-РГ», включающий два рентгеновских телескопа: российский — ART-XC и немецкий — eRosita (см. рис. 1). Кроме научной важности данный проект делают уникальным некоторые его

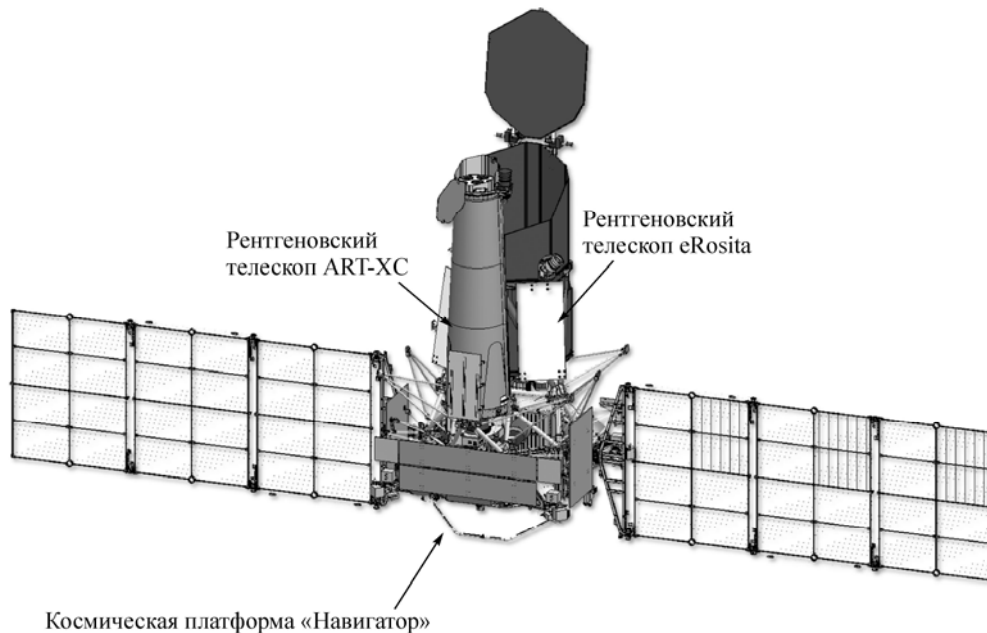


Рис. 1. Космическая обсерватория «Спектр-РГ».

технические аспекты. Так, впервые в отечественной практике создается рентгеновский телескоп на базе зеркальной оптики косоугольного падения и стриповых детекторов из CdTe. Также впервые для отечественной космонавтики этот телескоп должен быть доставлен в либрационную точку L2.

Местом проведения второго космического эксперимента «Монитор всего неба» является Международная космическая станция. Основным прибором — рентгеновский монитор СПИН-Х1-МВН (см. рис. 2).

И в телескопе ART-XC, и в мониторе СПИН-Х1-МВН базовым детектирующим устройством является блок рентгеновского детектора — БРД (рис. 3), содержащий полупроводниковый многомодульный или стриповый детектор, установленный на теплопоглощающей стороне ТЭП. В телескопе ART-XC установлены семь подобных блоков, в мониторе СПИН-Х1-МВН — четыре.

ТЭП является устройством, имеющим теплопоглощающую и тепловыделяющую поверхности. Для того чтобы его теплопоглощающая поверхность работала в режиме охладителя, необходима система вторичного удаления тепла с тепловыделяющей поверхности. В условиях космоса излучение является единственным методом удаления теплового потока без расхода рабочего тела [2]. Расходные методы в космических устройствах не используются из-за ограниченности ресурса по массе и возможного загрязнения внешних поверхностей космических аппаратов продуктами испарения. Поэтому в космических приборах, в том числе в телескопе ART-XC и в мониторе СПИН-Х1-МВН, системы удаления тепла с тепловыделяющей поверхности ТЭП должны быть обязательно радиационными.

Вторичная система удаления тепла с тепловыделяющих поверхностей ТЭП в телескопе ART-XC представляет собой один радиатор-излучатель, соединенный с тепловыделяющими поверхностями ТЭП тремя тепловыми трубами. На двух трубах установлены по два ТЭП, на одной — три (рис. 4). В мониторе СПИН-Х1-МВН радиационная часть охладителя содержит два оппозитно ориентированных радиатора, соединенных между собой двумя U-образными тепловыми трубами. К нижней полке каждой из этих труб

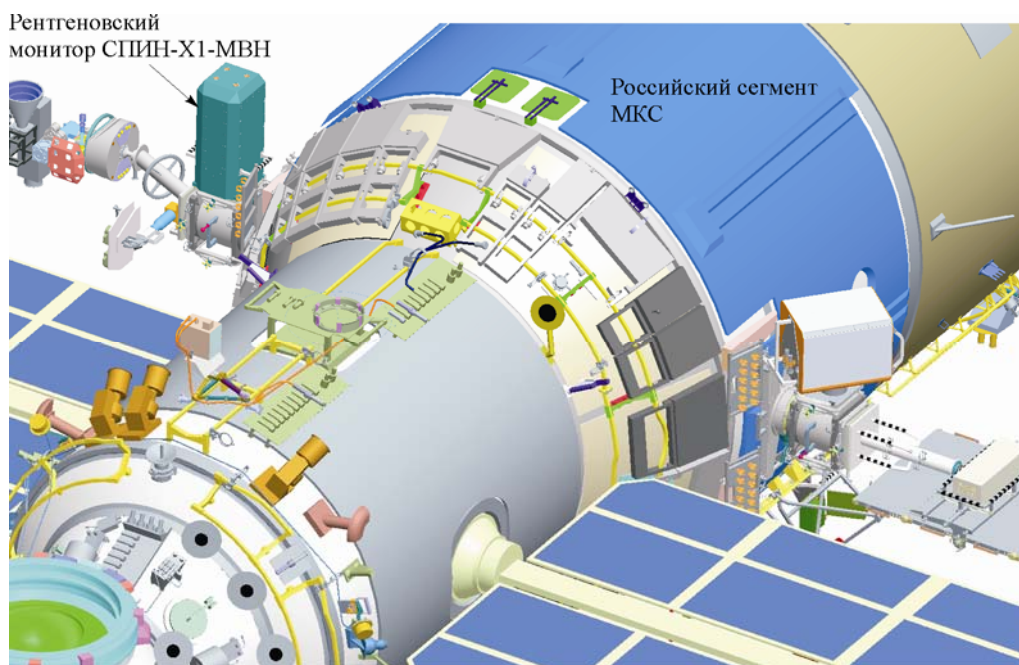


Рис. 2. Рентгеновский монитор СПИН-Х1-МВН на МКС.

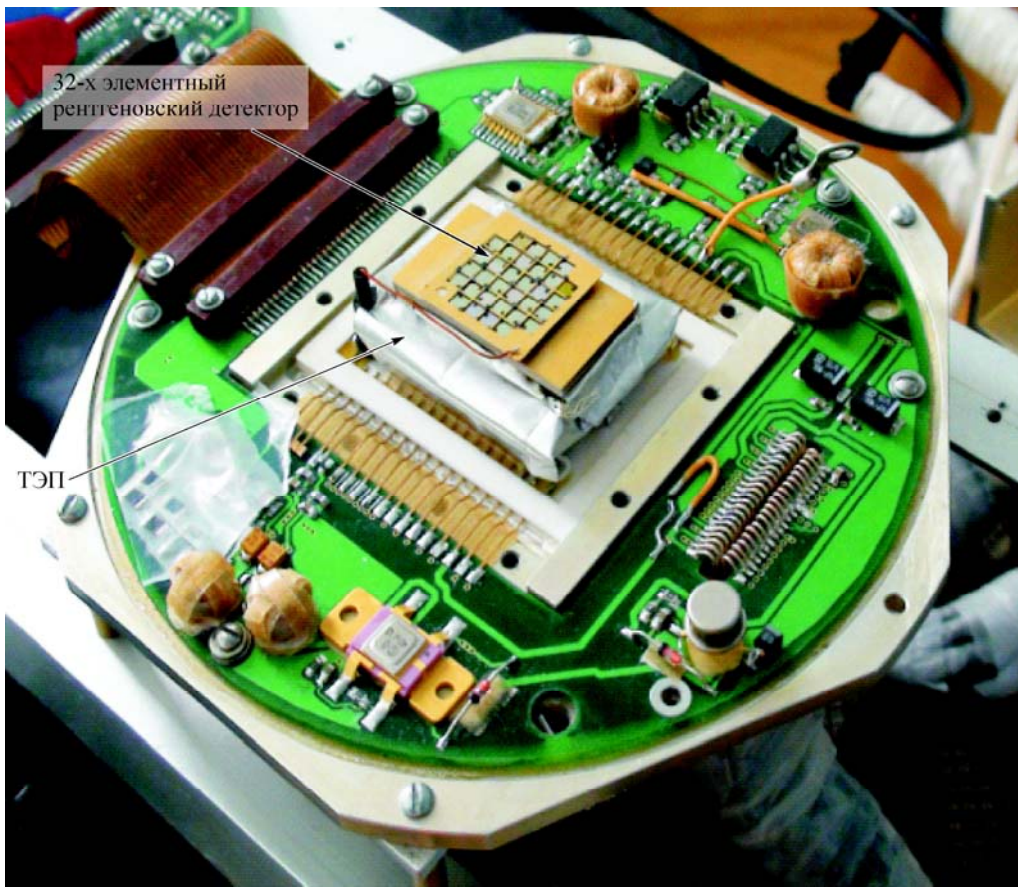


Рис. 3. Блок рентгеновского детектора монитора СПИН-Х1-МВН.

крепятся по два БРД со стороны тепловыделяющих поверхностей ТЭП (см. рис. 4). Различия в радиационной части систем термостабилизации этих двух телескопов обусловлены отличием окружающих их тепловых условий.

Система термостабилизации  
детекторов телескопа ART-XC

Система термостабилизации  
детекторов монитора СПИН-Х1-МВН

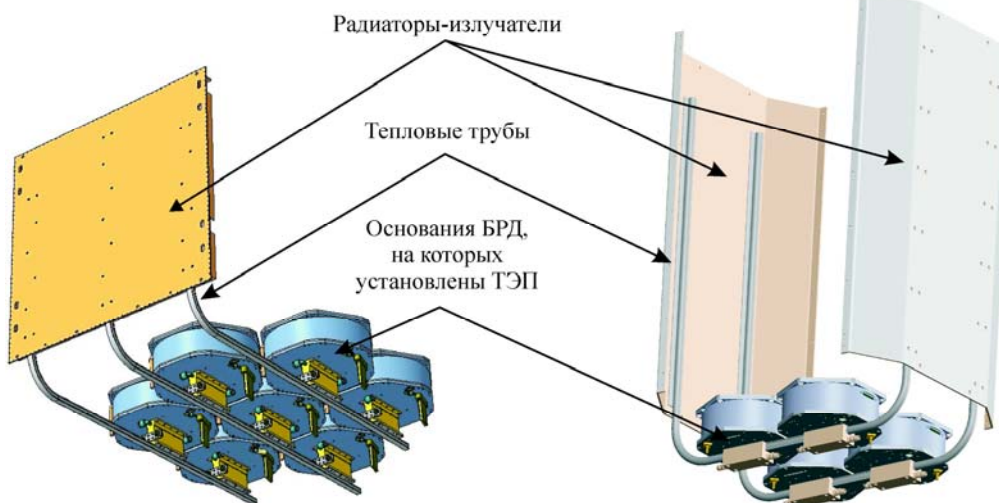


Рис. 4. Системы термостабилизации детекторов телескопа ART-XC и монитора СПИН-Х1-МВН.

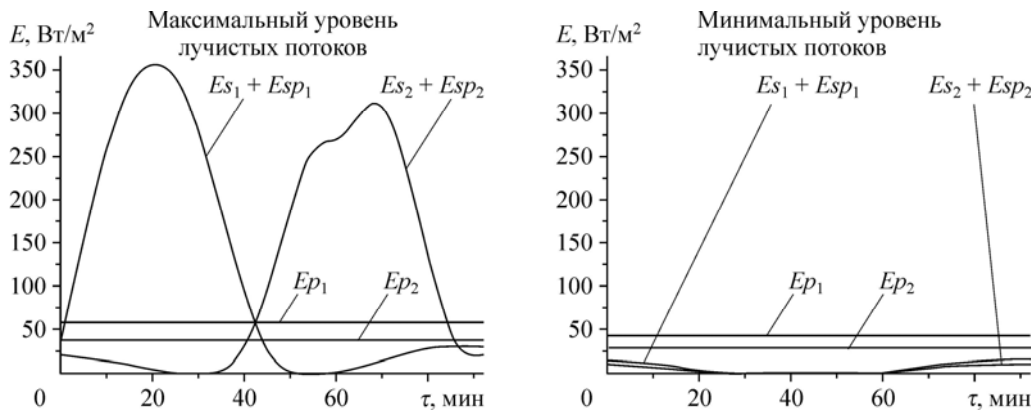
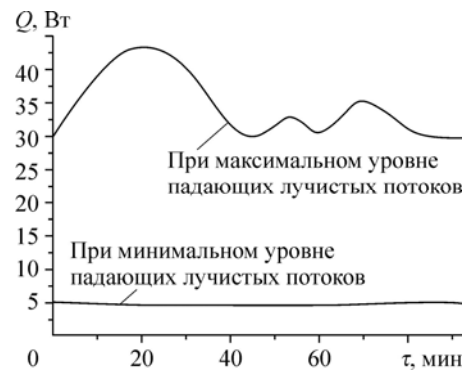


Рис. 5. Зависимость облученности внешними лучистыми потоками радиаторов-излучателей (индексами 1, 2 обозначены радиаторы системы термостабилизации детекторов монитора СПИН-Х1-МВН (см. рис. 4)) монитора СПИН-Х1-МВН от времени за один период обращения МКС вокруг Земли.

Рис. 6. Зависимость суммарного поглощенного радиаторами монитора СПИН-Х1-МВН лучистого потока от времени за один период обращения МКС вокруг Земли.



Обсерватория «Спектр-РГ» ориентирована относительно Солнца таким образом, что радиатор ART-ХС постоянно находится в тени и на него не попадает тепловой поток ни от Солнца, ни от какой-либо планеты. Поэтому создаются стабильные условия для теплового излучения с его поверхности. В таких условиях достаточно эффективно работает простая излучательная система с одним радиатором, которая совместно с ТЭП позволяет стабилизировать температуру детектора на заданном уровне  $-30 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

При размещении монитора СПИН-Х1-МВН на МКС с ориентацией в зенит на внешнюю поверхность прибора падают лучистые потоки от Солнца ( $E_s$ ,  $E_{sp}$ ) и от Земли ( $E_p$ ) [3], имеющие весьма высокую неравномерность (см. рис. 5). Компенсация этой неравномерности в системе термостабилизации происходит в два этапа. На первом этапе неравномерность уменьшается за счет применения проточной схемы системы термостабилизации, механизм работы которой описан в работе [4]. Однако при этом все равно сохраняется значительная нестабильность суммарного поглощенного радиаторами теплового потока, особенно при максимальном уровне падающих потоков (см. рис. 6). Поэтому окончательная компенсация неравномерности поглощенного лучистого потока для стабилизации температуры детектора в диапазоне  $-30 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  достигается за счет изменения электрического тока, проходящего через ТЭП.

### Характеристики охладителя на базе термоэлектрического преобразователя в условиях космического пространства

Трудность моделирования тепловых характеристик системы термостабилизации с ТЭП обусловлена возникновением в нем нелинейной обратной связи между тепловыделением объекта терморегулирования (холодопроизводительностью ТЭП) и температурой вторичной системы удаления тепла. Параметром, формирующим эту обратную связь, является температура тепловыделяющей поверхности ТЭП. Эта температура взаимозависима и от холодопроизводительности ТЭП, при поддержании на постоянном уровне

температуры его теплопоглощающей поверхности, и от температуры (излучаемого теплового потока) радиатора-излучателя. Таким образом, любое тепловое возмущение и со стороны ТЭП, и со стороны радиатора-излучателя приводит к изменению этой температуры, а значит, и текущего состояния ТЭП. При необходимости стабилизации температуры объекта терморегулирования это изменение необходимо компенсировать соответствующим регулированием тока через ТЭП. Все это говорит о необходимости расчета допустимого диапазона изменения тепловыделения объекта терморегулирования и предельного уровня падающих на радиатор тепловых потоков, при котором охладитель на базе ТЭП способен поддерживать температуру данного объекта постоянной.

Необходимо отметить, что положительная обратная связь характерна и для наземных охладителей, в которых ТЭП функционирует совместно с конвекционным или жидкостным теплообменником. Однако опыт использования таких охладителей неприменим для космического охладителя с радиатором-излучателем из-за различия в функциях передачи теплового потока окружающей среде [5].

Так, в системе с конвекционным или жидкостным удалением тепла эта функция равна  $\alpha(T_r - T_{\text{окр}})$ , где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $T_r$ ,  $T_{\text{окр}}$  — температура теплообменника и температура окружающей среды. Стабильность параметров такой системы обеспечивает высокий уровень коэффициента теплоотдачи ( $\alpha \approx 8 \div 15$ ) Вт/(м<sup>2</sup>·К) — при свободной конвекции), позволяющий стабилизировать систему при близких значениях  $T_r$  и  $T_{\text{окр}}$ . Это делает данную систему слабо чувствительной к изменению температуры теплообменника  $T_r$ .

В системе с излучением тепла передаточная функция равна  $\varepsilon\sigma(T_r^4 - T_{\text{окр}}^4)$ . Стабилизация в этом случае осуществляется за счет большой разницы четвертых степеней температур радиатора и окружающей среды при очень низком уровне коэффициента передачи:  $\varepsilon\sigma \approx 0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). В такой системе влияние температуры радиатора на температуру тепловыделяющей поверхности ТЭП должно быть существенно.

Для определения предельных уровней внутренних и внешних тепловых возмущений, при которых охладитель на базе ТЭП и радиатора-излучателя обеспечивает стабильную температуру объекта терморегулирования, была использована простейшая модель такого охладителя (см. рис. 7), включающая тепловыделяющий объект терморегулирования (1), ТЭП (2), теплопровод (3) и радиатор-излучатель (4). Для исследования свойств подобной системы можно использовать оценочную математическую модель, включающую три изотермических тепловых узла: первый — объект терморегулирования и холодная часть ТЭП, второй — горячая часть ТЭП, третий — радиатор-излучатель. Тепловой связью между первым и вторым узлом является ТЭП, между вторым и третьим — теплопровод. Для учета в модели теплоемкости теплопровода, она распределена между соединяемыми тепловыми узлами. Для упрощения тепловой модели сделано допущение, что температура окружающего пространства (4,2 К) пренебрежимо мала по сравнению с температурой радиатора-излучателя. Необходимо отметить, что все предложенные упрощения не искажают характера взаимосвязей между параметрами системы.

С учетом сделанных допущений, а также основных уравнений для формирования тепловой модели космического объекта [4] и расчета ТЭП [6] математическая модель рассматриваемой системы включает три уравнения:

$$C_c \frac{dT_c}{d\tau} = Q_0 \pm \Delta Q - E \cdot I \cdot T_c + \frac{I^2 R_e}{2} + \frac{T_h - T_c}{R_t},$$

$$C_h \frac{dT_h}{d\tau} = E \cdot I \cdot T_h + \frac{I^2 R_e}{2} - \frac{T_h - T_c}{R_t} - \frac{T_h - T_r}{R_{lp}},$$

$$C_r \frac{dT_r}{d\tau} = \frac{T_h - T_r}{R_{lp}} + ((As_r \cdot (Es_r + Esp_r) + \varepsilon_r \cdot Ep_r) - \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_r^4) S_r,$$

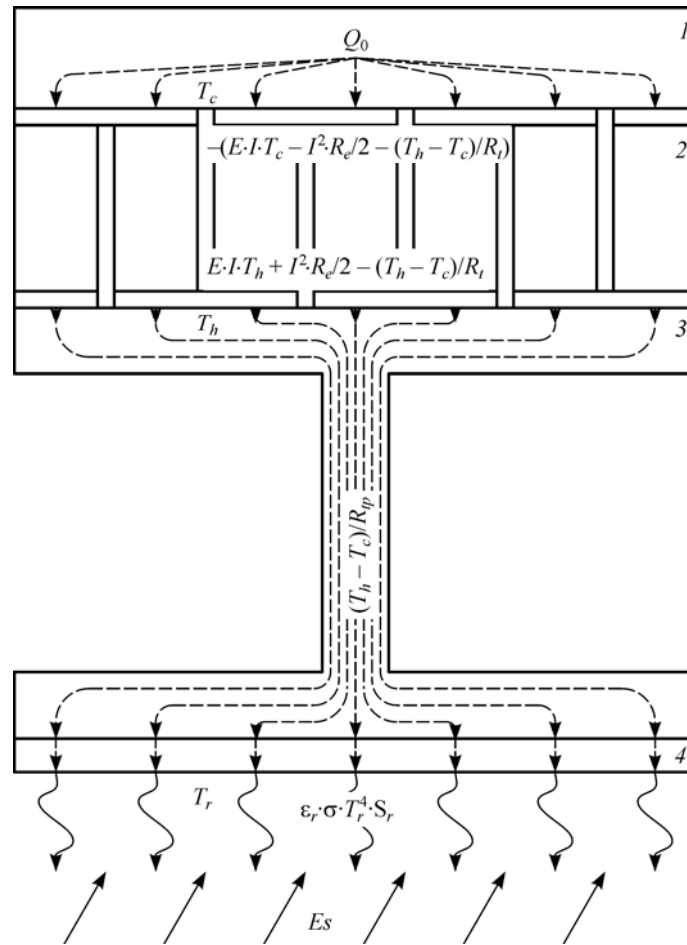


Рис. 7. Охладитель на базе ТЭП и радиатора-излучателя.

где  $C_c$ ,  $T_c$ ,  $C_h$ ,  $T_h$ ,  $C_r$ ,  $T_r$  — теплоемкость (Дж/К) и температура (К) первого, второго и третьего теплового узла,  $Q_0 \pm \Delta Q$  — тепловыделение (Вт) объекта терморегулирования с учетом возможного колебания  $\Delta Q$ ,  $E$  — коэффициент Зеебека ТЭП (В/К),  $I$  — сила тока (А), проходящего через ТЭП,  $R_e$ ,  $R_t$  — электрическое (Ом) и тепловое (К/Вт) сопротивления ТЭП,  $R_{tp}$  — тепловое сопротивление теплопровода (К/Вт),  $S_r$ ,  $\epsilon_r$  — площадь ( $\text{м}^2$ ) и степень черноты поверхности радиатора-излучателя,  $\tau$  — время (с),  $Es_r$ ,  $Esp_r$ ,  $Esp_r$  — значения облученности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) внешними лучистыми потоками (прямым солнечным излучением, отраженным от планеты солнечным излучением и собственным излучением планеты) поверхности радиатора-излучателя,  $\sigma \approx 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана.

В реальном ТЭП существуют следующие ограничения электрических и тепловых параметров:  $I \leq I_{\max}$ ,  $T_h - T_c \leq \Delta T_{\max}$ .

Для исследования характеристик охладителя на базе ТЭП и радиатора-излучателя был выбран термоэлектрический модуль, используемый в описанных выше космическом телескопе ART-XC и мониторе СПИН-Х1-МВН. Данный ТЭП имеет 82 ветви с геометрическим фактором  $\gamma = 1735$ . Предельная холодопроизводительность такого ТЭП составляет 16,5 Вт, максимальная разница температур между горячей и холодной поверхностью — 72 К, предельная сила тока — 2,9 А. Для современных ТЭП это типовые характеристики,

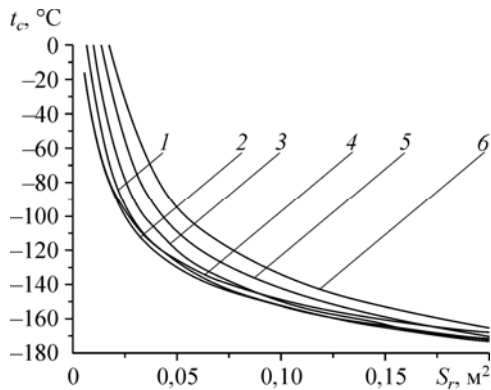


Рис. 8. Зависимость стационарной температуры объекта терморегулирования от площади радиатора-излучателя при различных значениях тока, проходящего через ТЭП.

$Q_0 = 1$  Вт;  $I = 0,5$  (1),  $0,25$  (2),  $0,75$  (3),  $0$  (ТЭП выключен) (4),  $1$  (5),  $1,25$  (6) А.

поэтому характер зависимостей, полученных для данного ТЭП, может быть распространён на все подобные устройства.

Граничными характеристиками охладителя на базе ТЭП и радиатора-излучателя являются:

- со стороны объекта терморегулирования – тепловыделение и температура объекта;
- со стороны радиатора-излучателя – площадь и температура радиатора.

На рис. 8 показан результат моделирования зависимости стационарной температуры объекта терморегулирования от площади радиатора-излучателя при различных значениях тока через ТЭП и при тепловыделении объекта терморегулирования, равном 1 Вт. Пересечение кривой, соответствующей выключенному ТЭП ( $I = 0$  А), с кривыми, соответствующими активному состоянию ТЭП ( $I = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$  А), показывает, что при фиксированном уровне тока питания ТЭП существует температура, выше которой выгоднее, с точки зрения минимизации площади радиатора-излучателя, использовать ТЭП в пассивном режиме, то есть в качестве теплопровода, а ниже — в активном, то есть в качестве холодильника. Так, например, в рассматриваемом охладителе для тока питания ТЭП равном 0,5 А, эта температура составляет  $-120$  °С.

Исследование характеристик данного охладителя выявило достаточно необычное его свойство. При его использовании для стабилизации температуры объекта терморегулирования на определенном уровне (при моделировании задавалось  $-30$  °С — оптимальная температура детекторов представленных в статье космических приборов) существует определенное значение тока через ТЭП, при котором требуемая площадь радиатора-излучателя минимальна (см. рис. 9). При снижении тепловыделения объекта терморегулирования  $Q_0$  это значение тока уменьшается.

Еще более парадоксальным является то, что температура радиатора-излучателя (см. рис. 10) и электрическая мощность ТЭП (рис. 11) при данных условиях тем выше, чем ниже тепловыделение объекта терморегулирования.

### Сравнение радиационных охладителей с ТЭП и с нагревателем

В космическом пространстве охладитель на базе радиатора-излучателя и ТЭП не является единственно возможным решением для охлаждения и стабилизации температуры детектора. Существует более простая система, выполняющая те же функции. В ней вместо ТЭП используется нагреватель. Тепловая модель данной системы может быть описана следующим набором уравнений:

$$C_c \frac{dT_c}{d\tau} = Q_0 \pm \Delta Q - \frac{T_c - T_h}{R_t}, \quad C_h \cdot \frac{dT_h}{d\tau} = Q_h + \frac{T_c - T_h}{R_t} - \frac{T_h - T_r}{R_{tp}},$$

$$C_r \frac{dT_r}{d\tau} = \frac{T_h - T_r}{R_{tp}} + ((A_s r \cdot (E_s r + E_{sp_r}) + \varepsilon_r \cdot E_{p_r}) - \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_r^4) \cdot S_r.$$



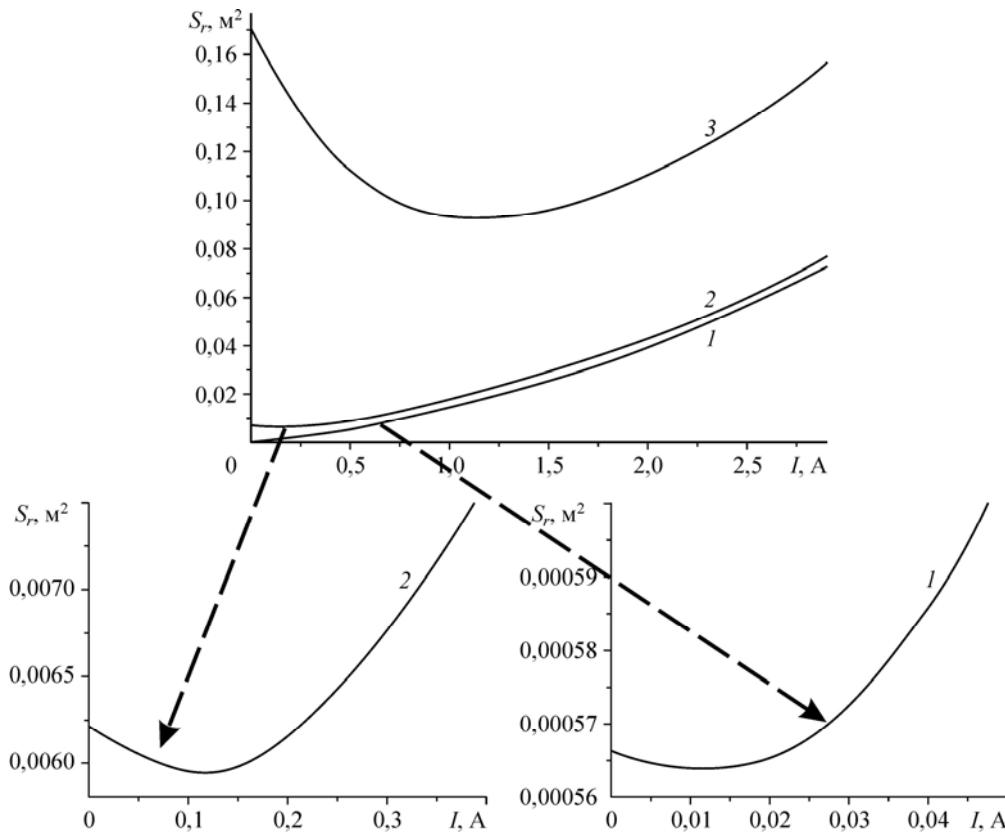


Рис. 9. Зависимость требуемой площади радиатора-излучателя от тока через ТЭП в охладителе, термостабилизирующем объект терморегулирования на постоянном уровне ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

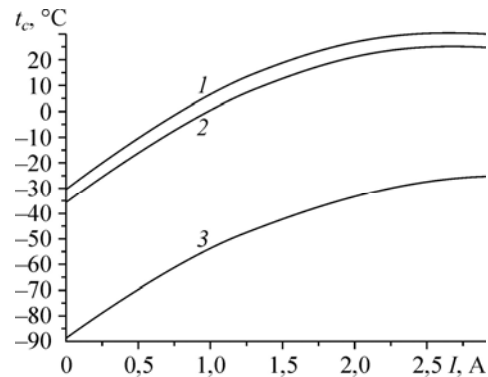
$$Q_0 = 0,1 (1), 1 (2), 10 (3) \text{ Вт.}$$

В данных уравнениях индекс «с» относится к объекту терморегулирования, а индекс «h» к нагревателю. Таким образом, все компоненты уравнений в этой системе аналогичны соответствующим компонентам в модели охладителя с ТЭП, кроме величин:  $R_t$  — тепловое сопротивление соединения объект-нагреватель,  $Q_h$  — тепловыделение нагревателя.

Целесообразно сравнить два охладителя с радиатором-излучателем, в одном из которых в качестве активного элемента используется ТЭП, а в другом — нагреватель. Критерием сравнения будет способность охладителя стабилизировать температуру на требуемом уровне при изменении внешних тепловых потоков и внутреннего тепловыделения объекта регулирования. Предельные значения этих характеристик для наиболее неблагоприятного стационарного температурного режима могут быть найдены из моделей охладителей при условии:  $C_c (dT_c/d\tau) = 0$ ,  $C_h (dT_h/d\tau) = 0$ ,  $C_r (dT_r/d\tau) = 0$ . Внешними возмущениями в математических моделях являются зависящие

Рис. 10. Зависимость температуры радиатора-излучателя от тока через ТЭП в охладителе, термостабилизирующем объект терморегулирования на постоянном уровне ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

$$Q_0 = 0,1 (1), 1 (2), 10 (3) \text{ Вт.}$$



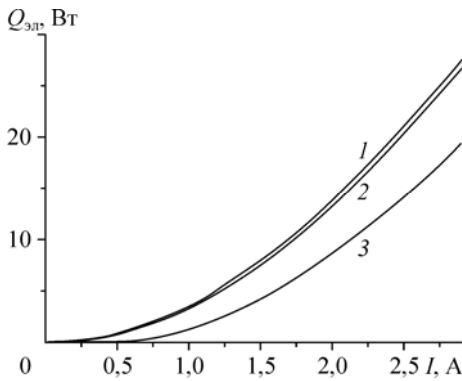


Рис. 11. Зависимость мощности электропитания ТЭП от тока через него в охладителе, термостабилизирующем объект терморегулирования на постоянном уровне (-30 °С).

$Q_0 = 0,1$  (1), 1 (2), 10 (3) Вт.

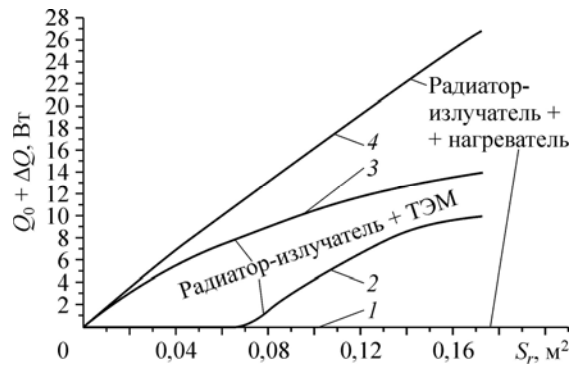


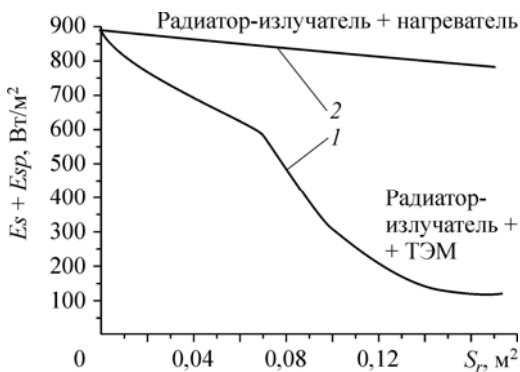
Рис. 12. Зависимость допустимого тепловыделения термостабилизированного при температуре -30 °С объекта терморегулирования от площади радиатора-излучателя при использовании ТЭП или нагревателя.

1, 2 —  $Q_0 - \Delta Q_{\max}$  при  $T_c = -30$  °С; 3, 4 —  $Q_0 + \Delta Q_{\max}$  при  $T_c = -30$  °С.

от времени величины  $\Delta Q$ ,  $E_{s_r}$ ,  $E_{sp_r}$  и  $E_{p_r}$ . Для наглядной демонстрации возможностей охладителей целесообразно отдельно исследовать их устойчивость к изменению тепловыделения объекта терморегулирования и к изменению уровня внешних лучистых потоков, падающих на радиатор-излучатель.

На рис. 12 представлены результаты моделирования зависимости диапазона допустимого изменения тепловыделения  $Q_0 \pm \Delta Q$  объекта терморегулирования при постоянной температуре -30 °С от площади радиатора-излучателя, изменяющейся в диапазоне от 0 до 0,17 м<sup>2</sup>. Анализ результатов показывает, что диапазон допустимого колебания тепловыделения у системы с ТЭП ниже по сравнению с системой с нагревателем; характер изменения этого параметра различен для данных систем. С увеличением площади радиатора-излучателя этот диапазон у системы с нагревателем расширяется и сужается у системы с ТЭП. Таким образом, если при малых значениях площади радиатора рассматриваемые охладители мало отличаются по данному параметру, то при увеличении площади разница между охладителями становится значительной. Эти результаты объясняются следующим образом. Система с нагревателем имеет предельно возможные характеристики, определяемые теплоизлучающей способностью радиатора-излучателя. Нагреватель в этом случае выполняет функцию дополнения переменного тепловыделения объекта регулирования до постоянного уровня.

Основным фактором, определяющим характер изменения тепловых характеристик радиационного охладителя с ТЭП, является сложная положительная обратная связь между тепловыделением объекта терморегулирования и температурой радиатора-излучателя. Аналогичный характер имеет зависимость максимально допустимого уровня облученности



внешними лучистыми потоками радиатора-излучателя от его площади для двух типов охладителей (см. рис. 13). В итоге

Рис. 13. Зависимость максимально допустимой облученности солнечным излучением поверхности радиатора-излучателя от его площади в радиационных охладителях с ТЭП и с нагревателем, обеспечивающими термостабилизацию объекта на уровне -30 °С при его минимальном допустимом тепловыделении.

1, 2 —  $(E_s + E_{sp})_{\max}$  при  $T_c = -30$  °С и  $Q = Q_0 - \Delta Q_{\max}$ .



Рис. 14. Зависимость температуры объекта массой 10 г и тепловыделением 10 Вт от времени при его охлаждении от уровня  $20 ^\circ\text{C}$  с максимально возможной скоростью при использовании охладителей с ТЭП и с нагревателем в течении 10 мин.

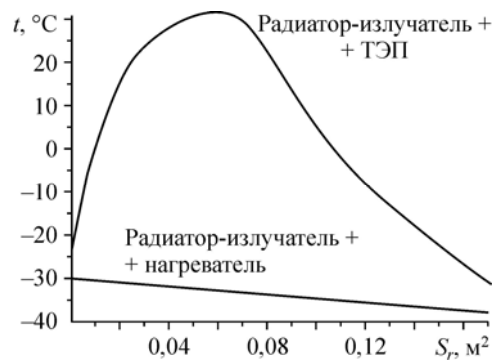


Рис. 15. Зависимость температуры радиатора охладителей с ТЭП и с нагревателем от его площади при температуре объекта термостабилизации  $-30 ^\circ\text{C}$ .

из данных зависимостей следует, что использование для космических приборов радиационного охладителя с нагревателем является более выгодным по сравнению с использованием охладителя с ТЭП с точки зрения минимизации площади радиатора и мощности электроснабжения активного элемента охладителя. При этом возникает вопрос: стоит ли вообще использовать ТЭП в сочетании с радиатором-излучателем в космосе?

Однако два фактора в некоторых случаях делают использования ТЭП в космической технике не только целесообразным, но и единственно возможным. Этими факторами являются возможность быстрого охлаждения объекта терморегулирования (см. рис. 14) и более высокая температура радиатора в охладителе с ТЭП по сравнению с охладителем с нагревателем (см. рис. 15). Более быстрое охлаждение обусловлено тем, что ТЭП сам является активным элементом, понижающим температуру только объекта терморегулирования, то есть части системы, имеющей ограниченную тепловую инерционность. А в охладителе с нагревателем единственным охлаждающим элементом является радиатор-излучатель, который должен снижать температуру всех элементов охладителя, составляющих ее полную теплоемкость. При этом эффект Пельтье обладает гораздо более высокой потенциальной скоростью охлаждения по сравнению со снижением температуры радиатора за счет пассивного излучения теплового потока в космическое пространство.

На рис. 14 представлена зависимость температуры объекта массой 10 г от времени при его охлаждении от уровня  $20 ^\circ\text{C}$  с максимально возможной скоростью при использовании радиационных охладителей с ТЭП и с нагревателем в течение 10 мин.

Более высокая скорость охлаждения позволяет охладителю с ТЭП более оперативно реагировать на изменение внутренних тепловых условий, а более высокая температура радиатора делает его менее восприимчивым к изменению внешних тепловых условий.

### Заключение

1. В настоящее время из-за все более широкого применения ТЭП в космических приборах возникла необходимость исследования характеристик охладителей на базе ТЭП, пригодных для использования в космосе. Единственным возможным вариантом такого охладителя является блок из ТЭП и радиатора-излучателя. Опыт использования наземных охладителей на базе ТЭП для этого охладителя неприменим из-за различия в механизме удаления тепла с тепловыделяющей поверхностью ТЭП.

2. Сочетание ТЭП и радиатора-излучателя приводит к возникновению между ними сложной обратной связи, в результате которой система из этих двух элементов приобретает необычные свойства. К таким свойствам относится появление минимума в графической зависимости площади радиатора-излучателя от тока через ТЭП при постоянном уровне температуры объекта терморегулирования. При этом соответствующее этому минимуму значение тока через ТЭП уменьшается при снижении тепловыделения объекта терморегулирования. Весьма необычным является то, что при фиксированной температуре объекта терморегулирования температура радиатора-излучателя и электрическая мощность ТЭП тем выше, чем ниже его тепловыделение.

3. Проведено сравнение характеристик двух типов охладителей, которые могут быть использованы для термостабилизации космических устройств при сравнительно низкой температуре: традиционной системы на базе радиатора-излучателя со стабилизирующим нагревателем и системы из радиатора-излучателя и ТЭП. На основании проведенного сравнения было установлено:

– использование для космических приборов радиационного охладителя с нагревателем является более выгодным по сравнению с использованием охладителя с ТЭП с точки зрения минимизации площади радиатора и мощности электроснабжения активного элемента охладителя;

– преимуществами охладителя с ТЭП по сравнению с системой с нагревателем являются возможность более быстрого охлаждения, которое позволяет быстрее реагировать на изменение тепловых условий, и более высокая рабочая температура радиатора, что делает охладитель менее восприимчивым к уровню внешнего теплового фона.

#### Список литературы

1. Pavlinsky M., Akimov V., Levin V. et al. The ART-XC instrument on board the SRG mission // Proc. of the SPIE. 2011. Vol. 8147. P. 814706-1–6.
2. Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И., Залетаев В.М., Козелкин В.В., Евланов Е.Н. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды // Под ред. акад. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 380 с.
3. Семена Н.П. Определение ориентации космического аппарата на основе анализа поля температур его внешней поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 135–147.
4. Семена Н.П., Коновалов А.А. Методы создания механизмов саморегулирования пассивных систем обеспечения теплового режима устройств космического применения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 1. С. 87–98.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
6. Кораблев В.А., Тахистов Ф.Ю., Шарков А.В. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: уч. пособие // Под ред. проф. А.В. Шаркова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2003. 44 с.

*Статья поступила в редакцию 28 февраля 2012 г.*