

Космические солнечные энергосистемы гироскопического и циклического функционирования с элементной совместимостью составляющих и новым алгоритмом преобразования теплового излучения

Ю. М. Марьинских

Gyroscopic Solar Power Satellite with the New Thermal Conversion System and Superconductive Generator

DOI: 10.3103/ S0003701X19060070

New Generation Thermodynamic Autonomously Managed Space Solar Power Plant

DOI:10.1134/S1810232814040109

The Material of the Working Fluid of the Solar Energy Heat Converter for Space Application

DOI: 10.2412/mmse.90.3.605



Проблемы в разработке и реализации проектов КСЕС

- Научную и практическую значимость разработанных проектов космических солнечных энергосистем гироскопического и циклического функционирования необходимо представить в контексте краткого знакомства с ранее разработанными фирмами «Боинг», «Рокуэлл Инт» по программе НАСА с участием лауреата Нобелевской премии физика П. Глейзера.
- Основная проблема в разработке проектов космических солнечных электростанций заключалась в выборе тепловой или фотоэлектрической системы преобразования.

Несмотря на все преимущества: высокий КПД тепловой системы преобразования (до 39%), освоена технология производства турбогенераторов с развитой промышленной базой, использование не дефицитных материалов, устойчивых к воздействию космической радиации, существуют факторы, которые сдерживают реализацию этих проектов. К ним относится большая удельная масса системы преобразования в среднем равная $3,4 \text{ кг} \cdot \text{кВт}^{-1}$ [1], Solar Power Satellite (SPS) (см. табл.)

Элементы	Масса, т
Система теплоотвода	10769
Несущая конструкция	6254
Рабочее тело (калий)	6085
ПТП с электрогенераторами (1,15 ГВт)	1933
Фацеты	1837
Приемники излучения	1000
Вторичные конденсаторы	324
Итого:	48175

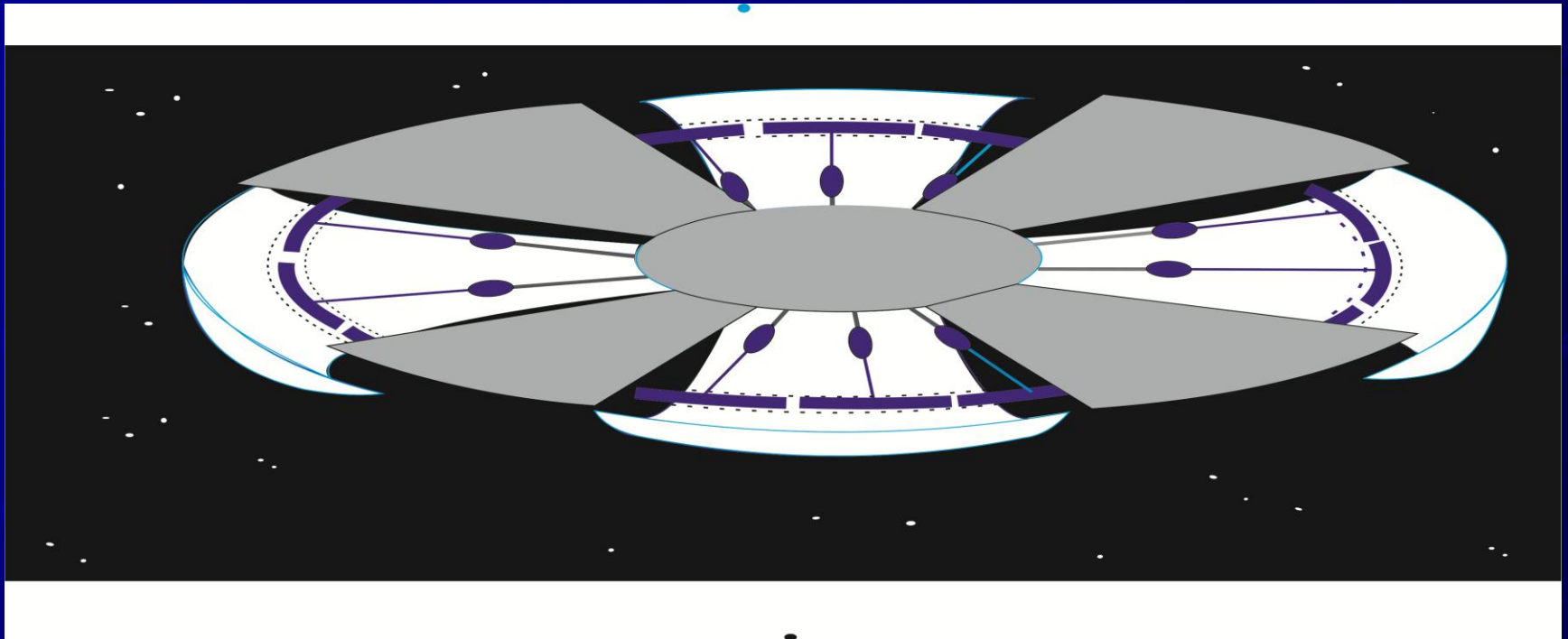
Проектанты КСЕС (допущение автора) полагались на стратегию будущего развития космической отрасли при которой ракетоносители способны выводить на геостационарную орбиту полезные грузы с необходимыми массогабаритными характеристиками. Так проекты с газатурбинными системами преобразования[2], рассчитанные на получение 10 ГВт электрической мощности на выходных электрошинах наземной приемной ректенны подвергались изменениям на предмет тепловых систем [3,4], в результате возникла необходимость в системе наведения для удержания отраженного излучения над входом отверстия приемника. Была разработана система наведения.

Эта система не является решением задачи наведения, так как при эксплуатации КСЭС возникнут механические колебания, максимально близкие к резонирующим, что ведет к нулю ожидаемый эффект. Механические колебания будут передаваться по системе преобразования и может привести к вероятности разрушения отдельных резонирующих узлов и частей КСЭС. Эта проблема в проектах не рассматривается.

Система прямого фотоэлектрического преобразования имеет ряд преимуществ по разворачиванию в космосе гибких фотопреобразующих панелей с относительно малыми массовыми параметрами. Сегодня она приоритетна и частично начала реализовываться ведущими странами в области космической энергетики.

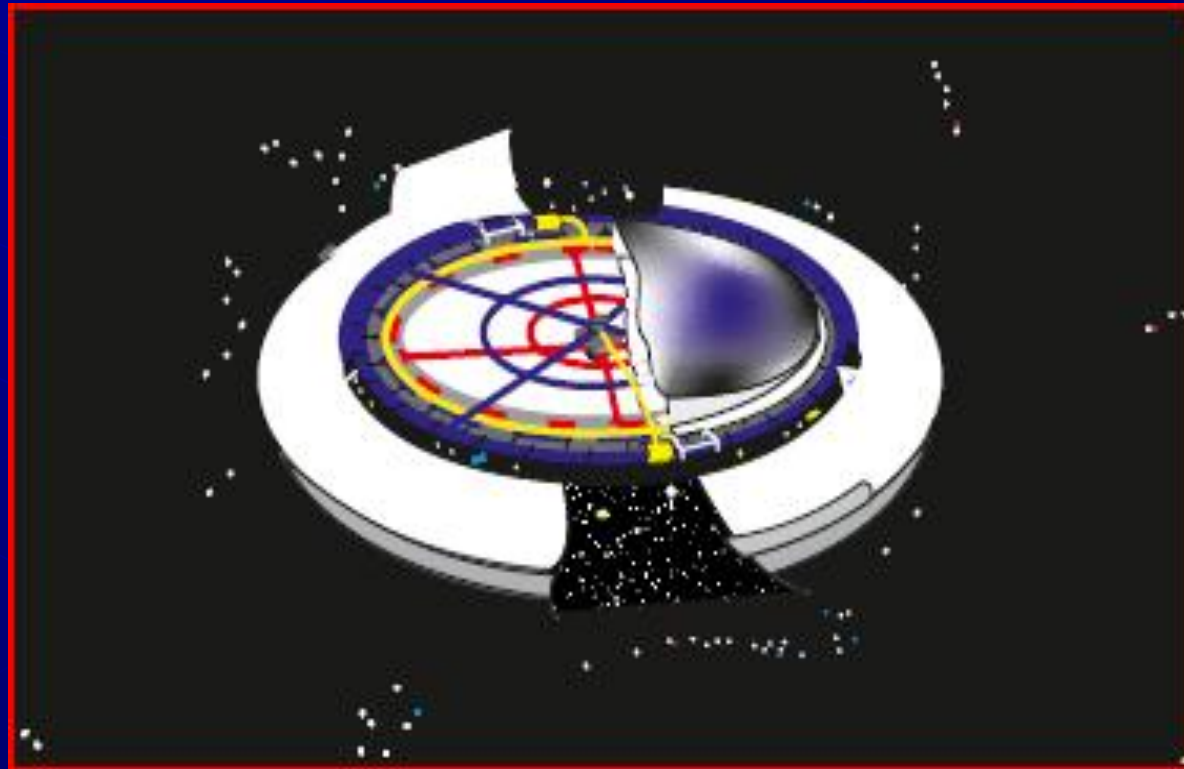
Однако сложно рассчитать стоимость производства требуемого количества фотопреобразующего материала и рабочих элементов из него. Нет однозначности в стоимости одного киловатта электроэнергии, выработанной орбитальной КСЭС с учетом ресурса фотоэлементов в условиях космоса. Эти факторы, а также проблемы реализации проектов тепловых КСЭС, дают основания вновь пересмотреть традиционные методы преобразования тепловой солнечной энергии в КСЭС.

На современном этапе возникла возможность использования сверхпрочных и легких конструкционных материалов из углерод-углеродных композитов для изготовления каркаса и силовых элементов энергетических систем космического назначения. Применение высокотемпературных сверхпроводников и созданных на их основе сверхпроводящих электрогенераторов позволяет существенно снизить массогабаритные параметры сверхпроводящих КСЭС тепловой системы преобразования.



Уникальные особенности ГКСЭ с новой тепловой системой преобразования (ТСП) и сверхпроводящим генератором

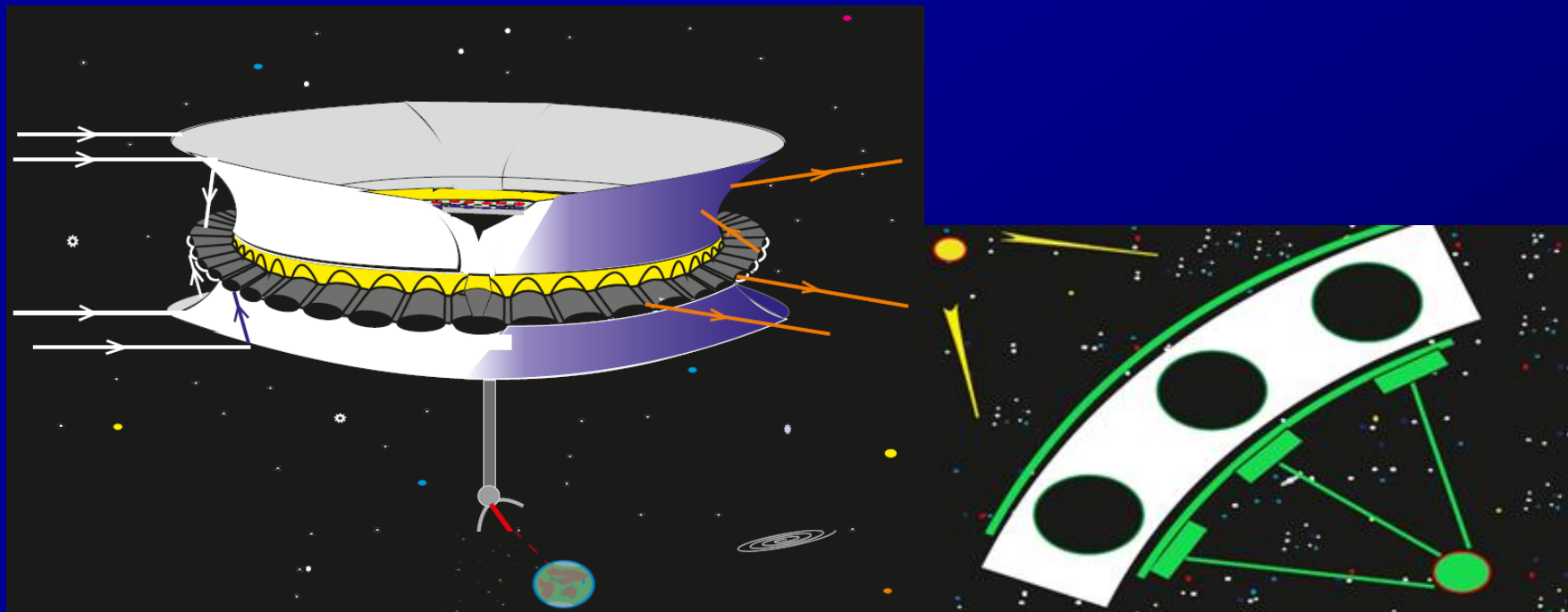
Основная особенность предлагаемого проекта в том, что он имеет возможность преобразовывать солнечную энергию в механическую и электрическую в необходимых соотношениях. Проект предусматривает возможность размещения и создания на энергостанции высокотехнологичного производства с регулируемой гравитацией, чем и поясняется её название.



К особенностям ГКСЭ следует отнести малые затраты при создании относительно дешевыми комплектующими по сравнению с фотопреобразующими КСЕС, для которых подходящими считаются гетероструктурные (многослойные) гибкие солнечные батареи CIGS на основе Cu (InGa) Se_2 . Но из-за сложности технологического процесса на уникальном оборудовании при их изготовлении разными производителями стоимость в итоге оказывается очень высокой. Поверхности большой площади таких дорогих фотопреобразователей невозможно сохранить от разрушающего воздействия электронами, протонами и метеорными потоками.

Особенностью созданного проекта гироскопической космической солнечной энергостанции (ГКСЭ) с новой тепловой системой преобразования (ТСП) и сверхпроводящим генератором является принципиально иной подход преобразования энергии полного спектра солнечного излучения в механическую и электрическую в необходимых соотношениях, нежели были разработаны до этого в области космической энергетики. Конструкция энергостанции предусматривает создание и размещение на ней высокотехнологического производства с регулируемой гравитацией. Конструкция позволяет не использовать паротурбинные и газотурбинные установки, систему наведения, а также холодильник-излучатель, масса которого составила бы около половины всей её массы. Их роль выполняют теплопреобразующие модули, движущиеся в круговой туннельной полости «тепловой ловушки», которая имеет прозрачную поверхность с низкоэмиссионным покрытием.

Использование в ГКСЭ высокотемпературных сверхпроводников, а также жаропрочных и легких конструкционных материалов из углеродсодержащих композитов значительно улучшают её энергетические и массогабаритные показатели. Это может быть малозатратным при её создании относительно дешевыми комплектующими по сравнению с фотопреобразующими КСЕС. Принцип функционирования энергостанции реализует возможность базирования аналогичных преобразователей на небесных объектах.



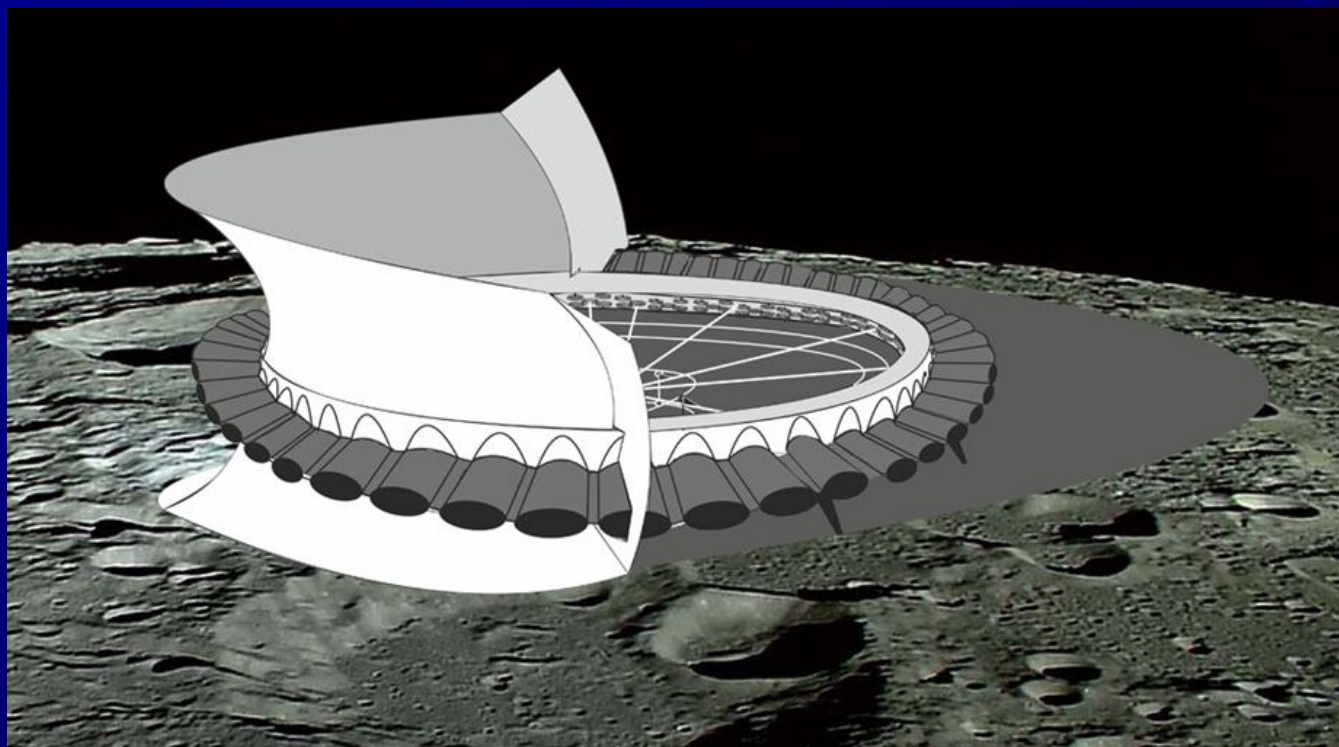
Использование в энергостанции высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) 2-го поколения, выпуск которых уже освоен, а также жаропрочных и легких конструкционных материалов с углеродных композитов [16,17,18,19] значительно улучшает ее энергетические и массогабаритные показатели. Объединение высокотемпературного теплоприемника и находящихся в теневой области за тепловым экраном низкотемпературных сверхпроводящих контуров генератора делает возможным в условиях космоса устанавливать необходимый для них температурный режим в течение всего жизненного цикла.

ГИРОСКОПИЧЕСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГОСТАНЦИЯ С НОВОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ГЕНЕРАТОРОМ

DOI: 10.3103/ S0003701X19060070

Аннотация. Проведен анализ методов преобразования солнечной энергии в проектах космических солнечных электростанций и проанализированы проблемы, сдерживающие их реализацию. Эффективность функционирования объясняется ее конструктивной особенностью, а также использованием сверхпрочных материалов из углеродного композита, прозрачного низкоэмиссионного магнетронного покрытия круговой туннельной полости «тепловой ловушки» и высокотемпературных сверхпроводников. Подробно рассмотрены устройство и принцип работы энергостанции. Дана оценка энергетических и массогабаритных параметров, проведен расчет удельных показателей во время функционирования в зависимости от степени солнечной концентрации и вида рабочего тела.

Представлены такие результаты оценки как: термический КПД преобразования в качестве рабочего тела гелия при концентрации солнечной энергии 74 и водяного пара при 38 составил 85% и 62,7% соответственно; удельная масса всей системы теплового преобразования составила 2,17 кг·кВт-1 и 2,61 кг·кВт-1; её удельная мощность - 12,3 кВт·м-2 и 6,79 кВт·м-2, удельная масса энергостанции составила 0,46 кВт·кг-1 и 0,38 кВт·кг-1. Предложенный принцип функционирования может быть использован на космических энергостанциях, базируемых на планетах солнечной системы и Луне.



Основные части конструкции ГКСЭ

В конструкциях разработанных проектов используется совмещение выполнения многофункциональных процессов одними и теми же частями конструкции в преобразовании энергии полного спектра солнечного излучения в механическую и электрическую в необходимых соотношениях.



Конструкция энергостанции представляет собой единую архитектуру технического сооружения состоящую из 4-х частей:

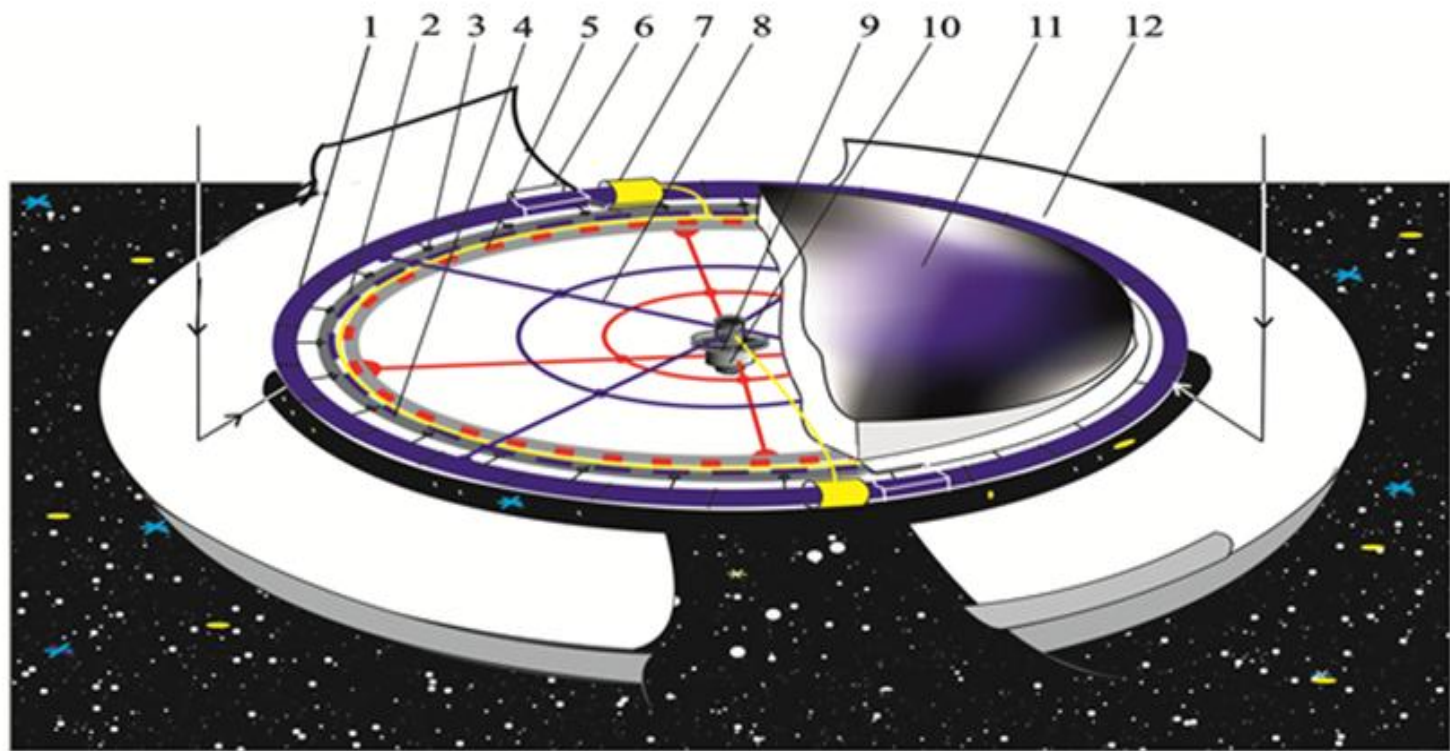
- первая — это круговая система из теплопреобразующих модулей.
- вторая - сверхпроводниковый генератор, который представляет синхронную электрическую машину.
- третья - солнечный концентратор в виде неполного кругового параболоцилиндра.
- четвертая - герметическое пространство над силовой рамой ГКСЭ с производственными, техническими и обслуживающими помещениями.



Схемы ГКСЕ с концентраторами (в статье)

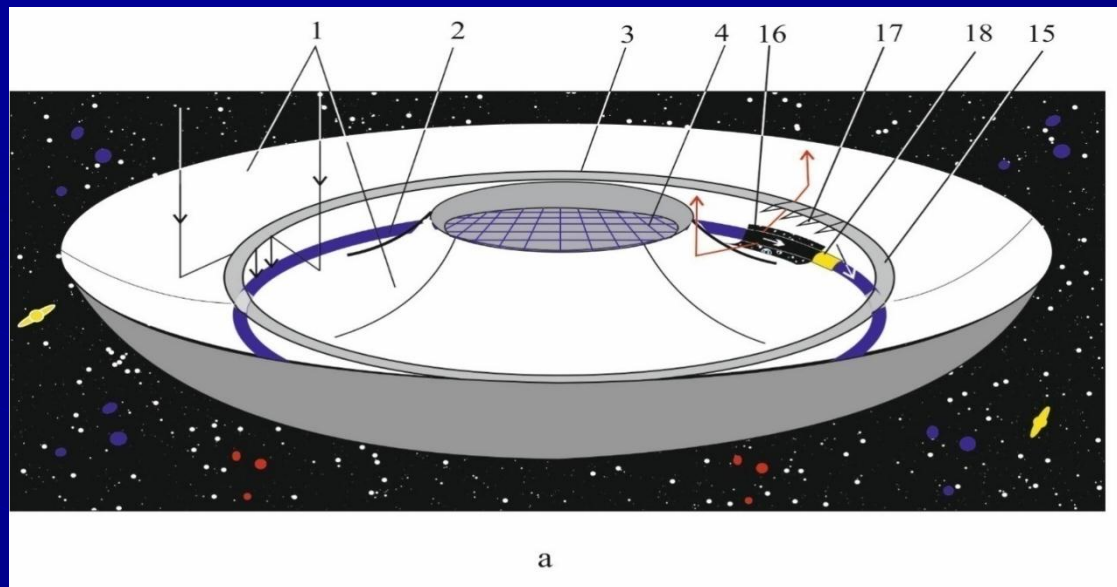
Рис.1. Принципиальная схема преобразования поступательного движения штока во вращательные движения несущих рам силовой установки

1 – несущая рама с теплопреобразующими модулями и с обмотками сверхпроводящего статора 6; 2 – несущая рама сверхпроводящего ротора; 3 – стыковочный узел кинематического преобразования; 4 – шток; 5 – полюса ротора; 7 – вариант размещения в центре сверхпроводящего генератора с указанием противоположного направления вращения валов, соединенных с рамой статора и ротора.



a

ГКСЕ и составной плёночный концентратор солнечного излучения над теплоприёмником (а), поперечный разрез энергостанции (б)



Второй вариант проекта ГКСЕ

Рис. 3. ГКСЭ и составной плёночный концентратор солнечного излучения над теплоприёмником (а), поперечный разрез энергостанции (б)

1— круговой параболоидный концентратор; 2— контур теплопреобразующих модулей; 3 — параболоидный отражатель концентрированного солнечного излучения; 4— солнечные элементы; 5—теплопреобразующий модуль; 6— стыковочный узел кинематической связи; 7— защитный тепловой экран из фольги; 8— обмотка статора; 9— технологическое помещение; 10— криостат; 11,12— вал силовой рамы статора и ротора; 13—контур циркуляции хладагента; 14—сверхпроводниковые катушки ротора; 15— контроотражатель в 3; 16— модули в теплоизлучающей зоне (в зависимости от размеров энергостанции таких зон может быть несколько) 17 —отражающая система для концентрированного солнечного излучения, падающего на поверхность “тепловой ловушки” за криостатом 18, где после рабочего цикла поршень с модулем переводится в исходное состояние.

Циклы теплового преобразователя: рабочее тело гелий (А), рабочее тело водяной пар (В)

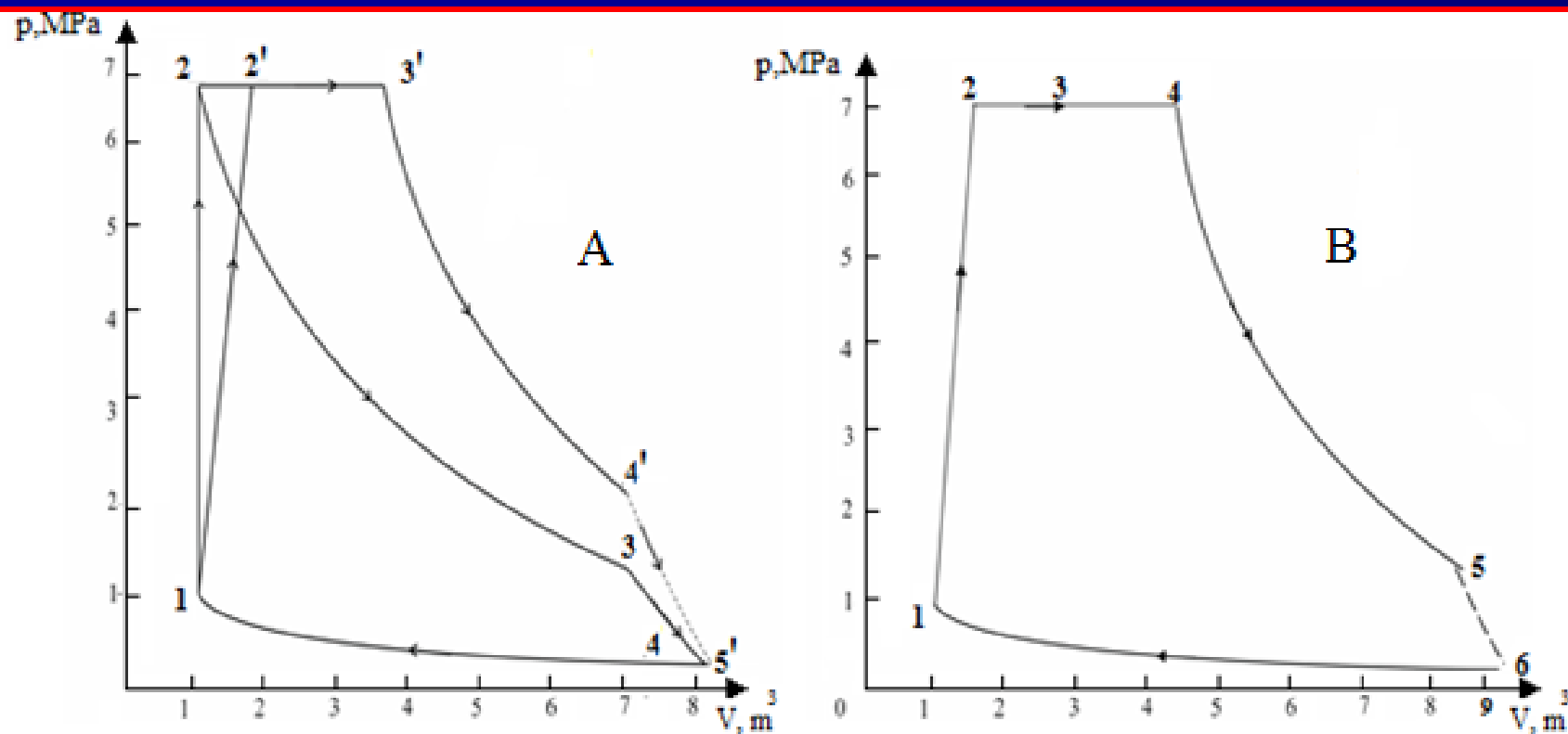
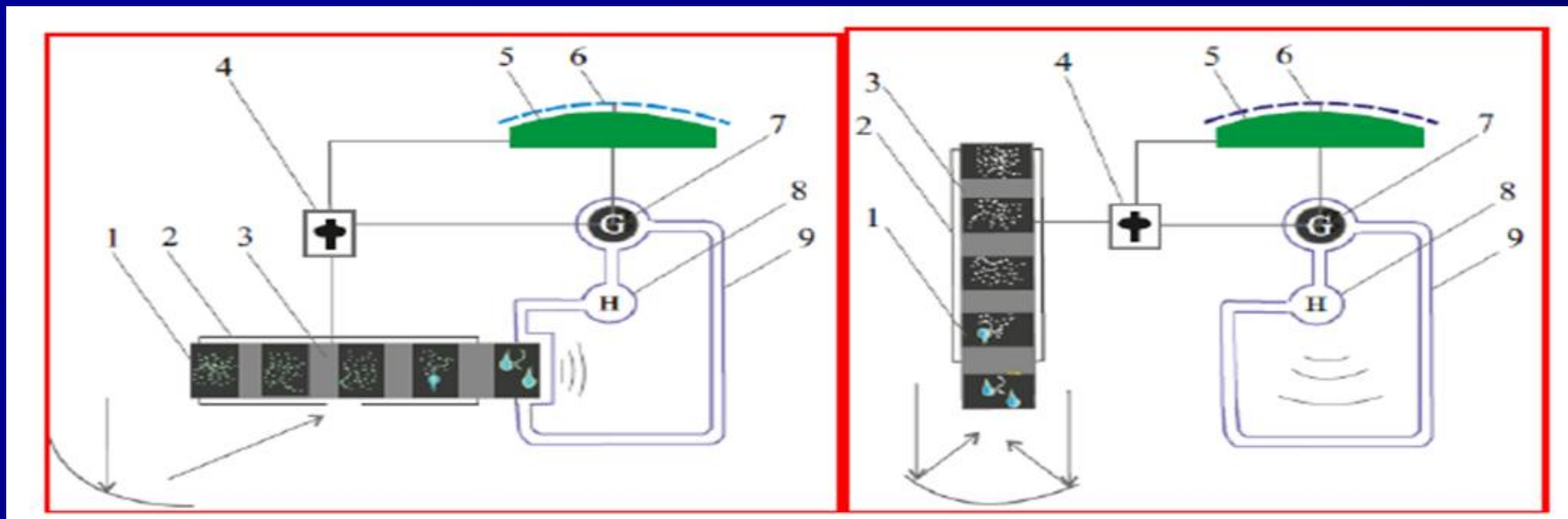


Рис.4. Циклы теплового преобразователя: рабочее тело гелий (А), рабочее тело водяной пар (В)
Fig.4. Cycles of the heat convertor: helium as an actuating medium (A), water steam as an actuating medium (B)

1-2'-3'-4'-5' вариант рабочего цикла теплового преобразователя при высокой степени солнечной концентрации, наклон 1-2' зависит от соотношения значений нагрузки и солнечной концентрации (А)

1-2 – нагрев воды до температуры кипения в точке 2; 2-3 – кипение при изобарно-изотермическом процессе; 3-4 – перегрев пара; 4-5 – интенсивный сброс тепла на начальном участке при более высокой температуре корпуса камеры с рабочим телом; 5-6 – завершение конденсации пара в холодильнике; 6-1 – перевод поршня и конденсата в начальное положение и состояние (В)

Сравнение схем теплового преобразования ГКСЭ (с разверткой теплоприемника двух вариантов) и КСЕС



1- модуль теплоприемника с рабочим телом; 2-каркас тепловой ловушки; 3- соединительный элемент модулей; 4-кинематический преобразователь поступательного движения во вращательное; 5-корпус производственного и технического назначения; 6-фотопреобразующая поверхность; 7-сверхпроводящий генератор; 8-насос; 9-корпус хладагента.



Энергетические и массогабаритные показатели ГКСЕ с новой ТСП и сверхпроводниковым генератором

n	30	32	34	36
Мощность $t.c.$, кВт	60	67	73	79.4
Мощность $g.$, кВт	57	63.6	69.4	74.6
Удельная мощность, кВт·кг ⁻¹	0.24	0.28	0.3	0.33

n	38	40	42	44	72
Мощность $t.c.$, кВт	85.5	91.5	97.4	103	158
Мощность $g.$, кВт	82.2	87.8	93.5	99	152
Удельная мощность, кВт·кг ⁻¹	0.36	0.38	0.4	0.43	0.66

Эффективность теплового преобразователя солнечного излучения $W_{t.c.}$, энергетическая эффективность сверхпроводникового генератора W_g и его удельные показатели от значений солнечной концентрации.

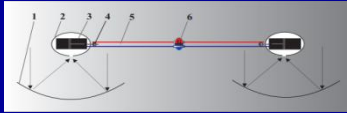
Энергетические и массогабаритные показатели ГКСЕ новой ТСП и сверхпроводниковым генератором

Рабочее тело	Гелий	Водяной пар
Солнечная концентрация	74	38
Диаметр ТСП <u>энергостанции</u> , м	150	150
Количество и / мощность всех модулей, МВт	205/11,4	145/12,8
Массы рабочего тела и /модуля, кг	3/118	66/165
Макс. и /мин. температуры цикла, К	1300/200	1000/373
Время <u>цикла</u> , с	276	662
КПД преобразования энергии рабочим телом, %	54	С фазовым переходом/без него
		13/17
Термический КПД, %	85	62,7
Удельная масса ТСП, кг·кВт ⁻¹	2,17	2,61
Удельная мощность ТСП, кВт·м ⁻²	12,3	6,79
Удельная масса <u>энергостанции</u> , кВт·кг ⁻¹	0,47	0,37

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАСС КСЕС И GSPS

Элементы при выходной мощности электрогенераторов в 1.1 ГВт	Масса, т	Масса GSPS, т в 1,1 ГВт
Система теплоотвода	30960	-
Приемники излучения	9070	876-890
Рекуператоры и теплообменники	4380	-
Электрогенераторы	4320	993
Фацеты	4200	Концентратор 109
Конструкция	2730	78
Турбокомпрессоры	1950	-
Система охлаждения электрогенераторов	820	32
Итого	58430	2102

РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ ПО ВЫВООДУ НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТУ GSPS



1, 2 – концентратор и тепловая ловушка плёночных типов с упругими элементами для развёртывания из транспортного положения; 3 – тепловоспринимающий модуль; 4 – преобразователь движений; 5 – несущая силовая ферма; 6 – электрогенератор.

Разработанный способ размещения частей GSPS в полезном объёме ракетоносителя диаметром 6,36 м и высотой 13 м позволяет на орбите развернуть её в рабочее состояние с параметрами: диаметральное расстояние между модулями $L=70$ м, внешний диаметр кругового параболоцилиндрического концентратора $D=120$ м, внутренний диаметр параболоцилиндрического концентратора, где не происходит приём солнечного излучения $d=10$ м, потери в теплоизлучающих зонах «окнах» $W = 3.2$ МВт, потребляемая мощность солнечного излучения теплопреобразующей системой $W = 11.74$ МВт.

New Generation Thermodynamic Autonomously Managed Space Solar Power Plant

Table 2. Energy characteristics of solar cells for using in space and thermodynamic part of the autonomously managed space solar power plant

Main characteristics	Semiconductor solar cells			Solar energy conversion to electric power by the thermodynamic part of the autonomously managed space solar power plant
	Gallium arsenide	Single-crystal	Amorphous	
Specific power, kW/m ²	0.37–0.38	0.23	0.10	4.30–4.33
Specific power, kW/kg	0.1–0.3	0.09–0.16	0.09	0.76–0.77
Specific weight, kg/m ²	2–2.5	1.7–1.85	0.3–0.4	5.5–5.6
	For other solar cells 4–6			
Specific weight, kg/kW	4–6			1.32–1.33
Specific weight of space power plant, kg/kW	up to 10			8.9
Operating current degradation rate over the operating lifetime, % (5–10 years)	15–25	20–30	7	Does not degrade

Материал рабочего тела теплового преобразователя солнечной энергии космического назначения



DOI 10.2412/mmse.90.3.605

Результатом исследования является разработка метода непрерывного получения полезной механической энергии посредством функционального материала (рабочим телом) в процессе нагрева его солнечным излучением в теплопоглощающей области и охлаждения в теневой области в оптимально расчётном диапазоне температур. Проведены теоретические исследования на предмет количественной оценки мощности металлического сегмента в роли рабочего тела теплопреобразующей панели при функционировании теплового преобразователя солнечной энергии (ТПСЭ) космического назначения.

Предложено решение позволяющее значительно повысить эффективность ТПСЭ посредством улучшения физико-технических характеристик материала сегмента. Показана перспективность изменения на сотые доли одного из серии параметров характеризующих материал сегмента, что приводит к возможности по эффективности конкурировать с фотопреобразующими системами при условии оптимального сочетания нескольких параметров.

Ограниченность земных энергетических ресурсов заставляет искать нетрадиционные способы получения энергии с использованием возобновляемых источников.

Механизм осуществления непрерывной полезной работы активной средой

Механизм осуществления непрерывной полезной работы активной средой энергетического материала (термоупругой металлической пластиной), находящийся в тепловой ловушке, заключается в периодическом преобразовании падающего солнечного излучения на ее поверхность, что приближена по тепловым свойствам к абсолютно черному телу, вследствие термического расширения и сжатия при охлаждении в зоне затенения по выходу из тепловой ловушки.

Материал сегментов должен соответствовать реализации основного его функционального назначения: непрерывно осуществлять механическую работу, иметь минимальную удельную теплоемкость и плотность, с максимальными значениями коэффициента теплового расширения, модуля упругости при физических нагрузках (сжатие - растяжение), а степень черноты поверхности пластин приближена к единице с возможностью размещения их в теплопоглощающей зоне тепловой ловушки и вне ее в зоне затенения.

Мощность, определяемая отношением выполненной сегментом работы в процессе его нагревания к затраченному времени на этот процесс, определится выражением:

$$P = \frac{\int_0^T 2VE\alpha^2 T dT}{\int_{T_0}^T \frac{h(cp + 2E\alpha^2 T)}{nG - \varepsilon\sigma T^4} dT}$$

На рисунке 1 изображены графики зависимости мощности сегментов при нагреве от значения температур 250 К до 430 К и в более высоком диапазоне температур от 350 К до 530 К соответственно при концентрациях $n = 1$ и $n = 2$.

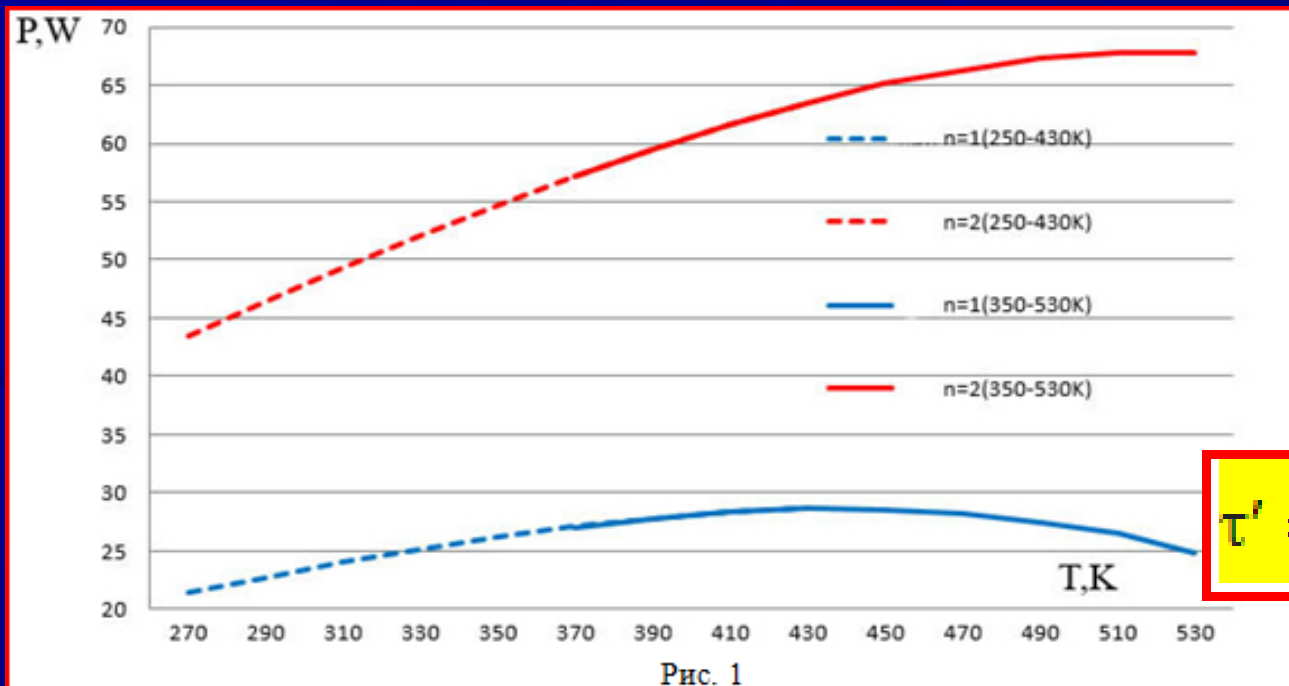


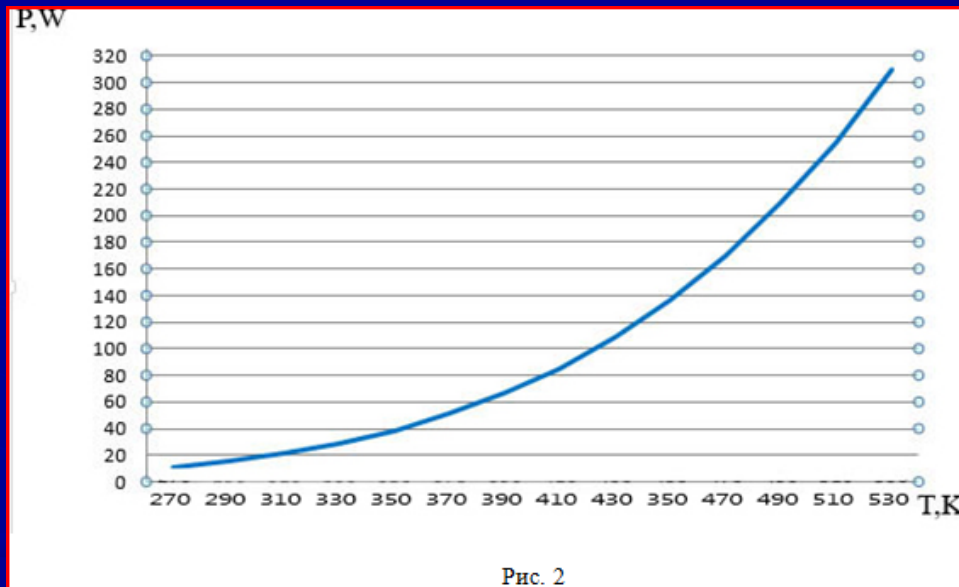
Рис. 1

Время охлаждения панели сегментов вне тепловой ловушки в затенении.

$$\tau' = \int_T^{T_0} \frac{h(cp - 2E\alpha^2 T)}{2\varepsilon\sigma T^4} dT.$$

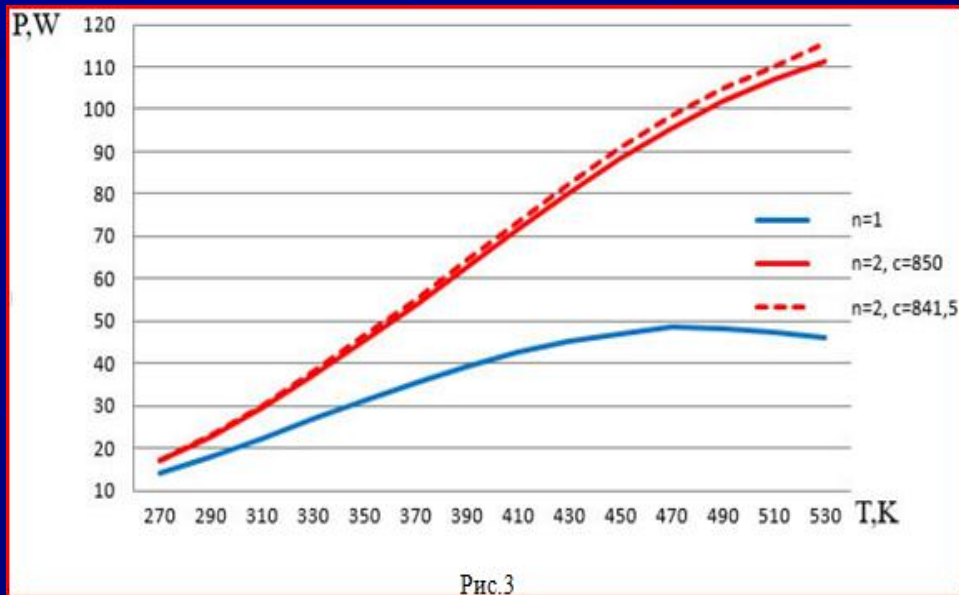
В знаменателе выражения (5) определения времени охлаждения сегмента панели коэффициент 2 свидетельствует об увеличении в два раза площади теплоизлучающей поверхности вне тепловой ловушки в затенении:

Мощность сегмента в процессе теплоизлучения (охлаждения) определяемая соотношением (6) иллюстрирована на рис.2.



$$P' = \frac{\int_{T_0}^T 2VE\alpha^2 T dT}{\int_{T_0}^T \frac{h(cp - 2E\alpha^2 T)}{2\varepsilon\sigma T^4} dT}.$$

Мощность за один цикл процесса теплопоглощения и теплоизлучения сегментом определяется выражением (7) и соответствующая ей зависимость изображена на рис.3.



$$P'' = \frac{\int_{T_0}^T 4VE\alpha^2 T dT}{\int_{T_0}^T \frac{hcp + 2Eh\alpha^2 T}{nG - \varepsilon\sigma T^4} dT + \int_T^{T_0} \left(\frac{hcp - 2Eh\alpha^2 T}{2\varepsilon\sigma T^4} \right) dT}$$

