

**Космічні сонячні енергосистеми гіроскопічного і
циклічного функціонування з елементним поєднанням
складових і новим алгоритмом перетворення теплового
випромінювання**
Ю. М. Мар'їнських

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



Проблеми в розробці та реалізації проектів космічних сонячних електростанції (КСЕС) теплової системи перетворення

Наукову і практичну значимість розроблених проектів космічних сонячних енергосистем гіроскопічного і циклічного функціонування необхідно представити в контексті короткого знайомства з раніше розробленими фірмами «Боїнг», «Рокуелл Інт» за програмою НАСА за участю лауреата Нобелівської премії П. Глейзера.

Основна проблема в розробці проектів космічних сонячних електростанцій (КСЕС) полягала у виборі теплової або фотоелектричної системи перетворення.

Незважаючи на всі переваги: високий ККД теплової системи перетворення (до 39%), освоєна технологія виробництва турбогенераторів з розвиненою промисловою базою, використання не дефіцитних матеріалів, стійких до впливу космічної радіації, існують чинники, які стримують реалізацію цих проектів. До них відноситься велика питома маса системи перетворення в середньому рівна $3,4 \text{ кг} \cdot \text{кВт}^{-1}$ [1], (Solar Power Satellite) SPS (див. Табл.)

Елементи	Маса, т
Система тепловідведення	10769
Несуча конструкція	6254
Робоче тіло (калій)	6085
ПТП з електрогенераторами (1,15 ГВт)	1933
Фацети	1837
приймачі випромінювання	1000
вторинні конденсатори	324
Разом:	48175

Проектанти КСЕС, (допущення автора) покладалися на стратегію майбутнього розвитку космічної галузі при якій ракетносії здатні виводити на геостаціонарну орбіту корисні вантажі з необхідними масогабаритними характеристиками. Так проекти з газотурбінними системами перетворення [2], розраховані на отримання 10 ГВт електричної потужності на вихідних електрошин наземної приймальної ректенни зазнавали змін на предмет теплових систем [3,4], в результаті виникла необхідність в системі наведення для утримання відбитого випромінювання над входом отворі приймача.

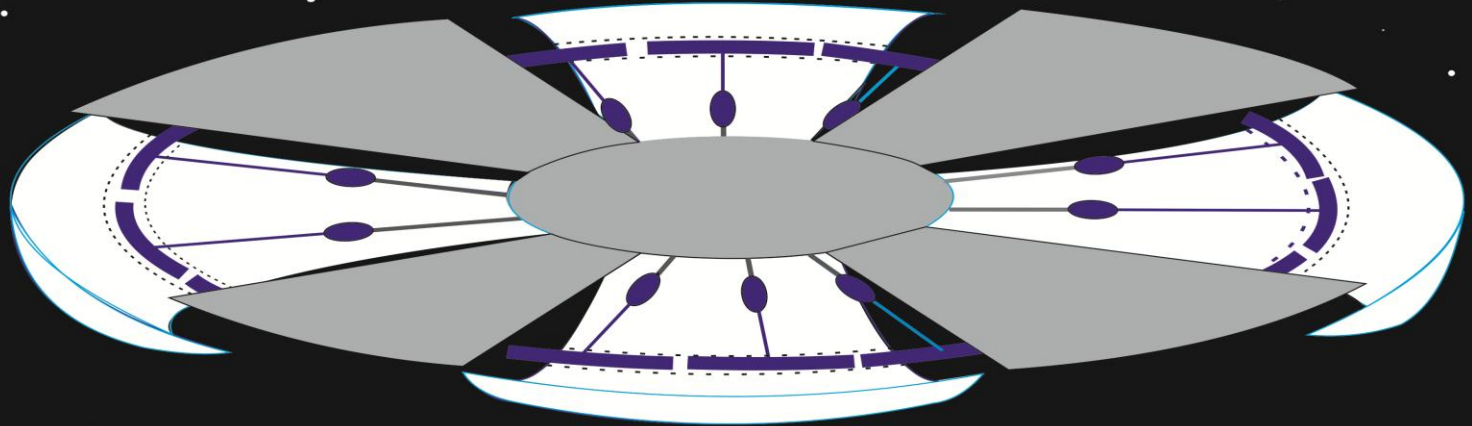
Була розроблена система наведення.

Ця система не є вирішенням завдання наведення, так як при експлуатації КСЕС виникнуть механічні коливання, максимально близькі до резонуючим, що веде до нуля очікуваний ефект. Механічні коливання будуть передаватися по системі перетворення, що призведе до ймовірності руйнування окремих резонують вузлів і частин КСЕС. Ця проблема в проектах не розглядається.

Система прямого фотоелектричного перетворення має ряд переваг по розгортанню в космосі гнучких фотоперетворюючих панелей з відносно малими масовими параметрами. Сьогодні вона пріоритетна і частково почала реалізовуватися провідними космічними країнами.

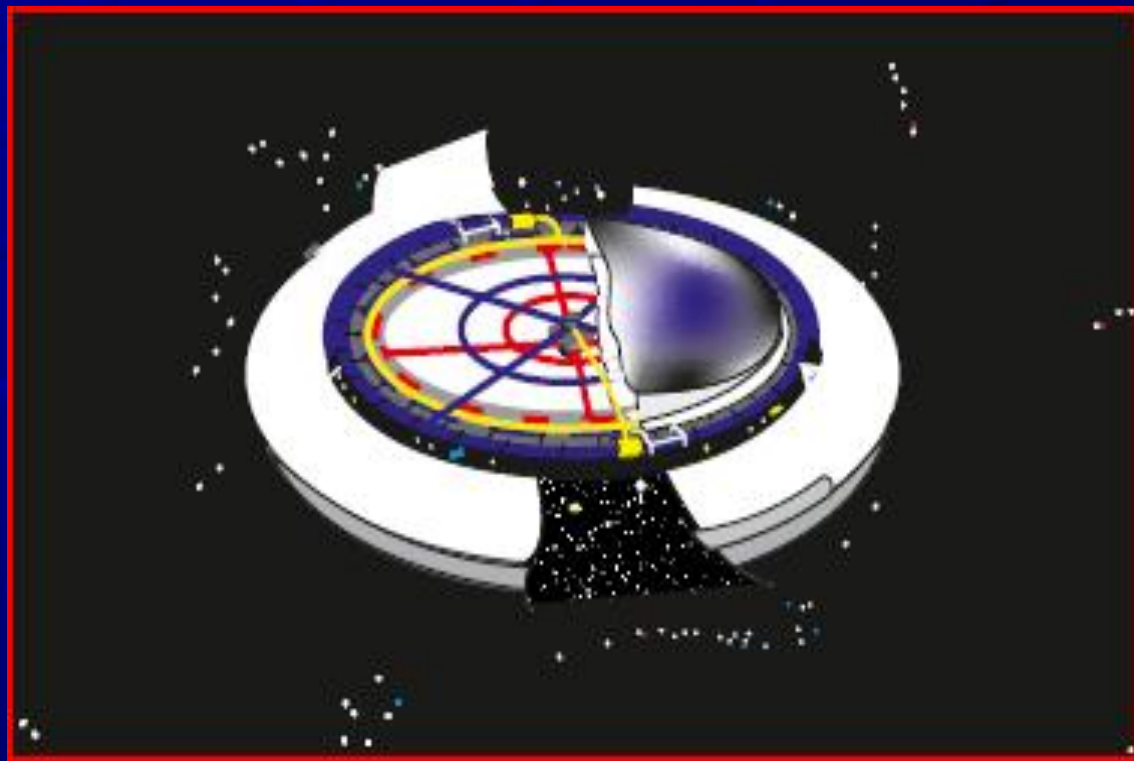
Однак складно розрахувати вартість виробництва необхідної кількості фотоперетворюючого матеріалу і робочих елементів з нього. Немає однозначності у вартості одного кіловата електроенергії, виробленої орбітальної КСЕС з урахуванням ресурсу фотоелементів в умовах космосу. Ці фактори, а також проблеми реалізації проектів теплових КСЕС, дають підстави знову переглянути традиційні методи перетворення теплової сонячної енергії в КСЕС.

На сучасному етапі виникла можливість використання надміцних і легких конструкційних матеріалів з вуглецевих композиційних матеріалів для виготовлення каркаса і силових елементів енергетичних систем космічного призначення. Застосування високотемпературних надпровідників і створених на їх основі надпровідних електрогенераторів дозволяє істотно знизити масогабаритні параметри надпровідних КСЕС теплової системи перетворення.



Унікальні особливості гіроскопічною космічної сонячної енергостанції (ГКСЕ) з новою тепловою системою перетворення (ТСП) і надпровідним генератором

Основна особливість пропонованого проекту в тому, що він має можливість перетворювати сонячну енергію в механічну і електричну в необхідних співвідношеннях. Проект передбачає можливість розміщення і створення на енергостанції високотехнологічного виробництва з регульованою штучної гравітацією, **тому вона і має таку назву.**



До особливостей ГКСЕ слід віднести малі витрати при створенні відносно дешевими комплектуючими в порівнянні з фотоперетворюючими КСЕС, для яких відповідними вважаються гетероструктурних (багатошарові) гнучкі сонячні батареї CIGS на основі Cu (InGa) Se_2 . Але через складність технологічного процесу на унікальному обладнанні при їх виготовленні різними виробниками вартість в результаті виявляється дуже високою. Поверхні великої площі таких дорогих фотоперетворювачів неможливо зберегти від руйнівної дії електронами, протонами і метеорними потоками.

Особливістю створенного проекту гіроскопічної космічної сонячної енергостанції (ГКСЕ) з новою тепловою системою перетворення (ТСП) і надпровідним генератором є принципово інший підхід перетворення енергії повного спектра сонячного випромінювання в механічну і електричну в необхідних співвідношеннях, ніж було розроблено до цього в області космічної енергетики.

Конструкція енергостанції передбачає створення і розміщення на ній високотехнологічного виробництва з регульованою гравітацією, що дозволяє не використовувати двигуни і газотурбінні установки, систему наведення, а також холодильник-випромінювач, маса якого становить близько половини всієї маси ГКСЕ. Їх роль виконують теплоперетворюючі робочі модулі, які рухаються в круговій тунельній порожнині «теплової пастки», що має прозору поверхню з низькоемісійним покриттям.

Використання в ГКСЕ високотемпературних надпровідників, а також жароміцних і легких конструкційних матеріалів з вуглець композитів [16,17,18,19] значно покращують її енергетичні та масогабаритні показники. Це робить маловитратним її створення відносно дешевими комплектуючими в порівнянні з фотоперетворюючими КСЕС. Принцип функціонування енергостанції дає можливість реалізувати базування аналогічних перетворювачів на небесних об'єктах.

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

Yu. M. Mar'yinskykh*

Department of System Engineering and Informational Technology, Sumy State University, Shostka Institute, Shostka, Sumskaya oblast, 41100 Ukraine

**e-mail: mymth44@gmail.com*

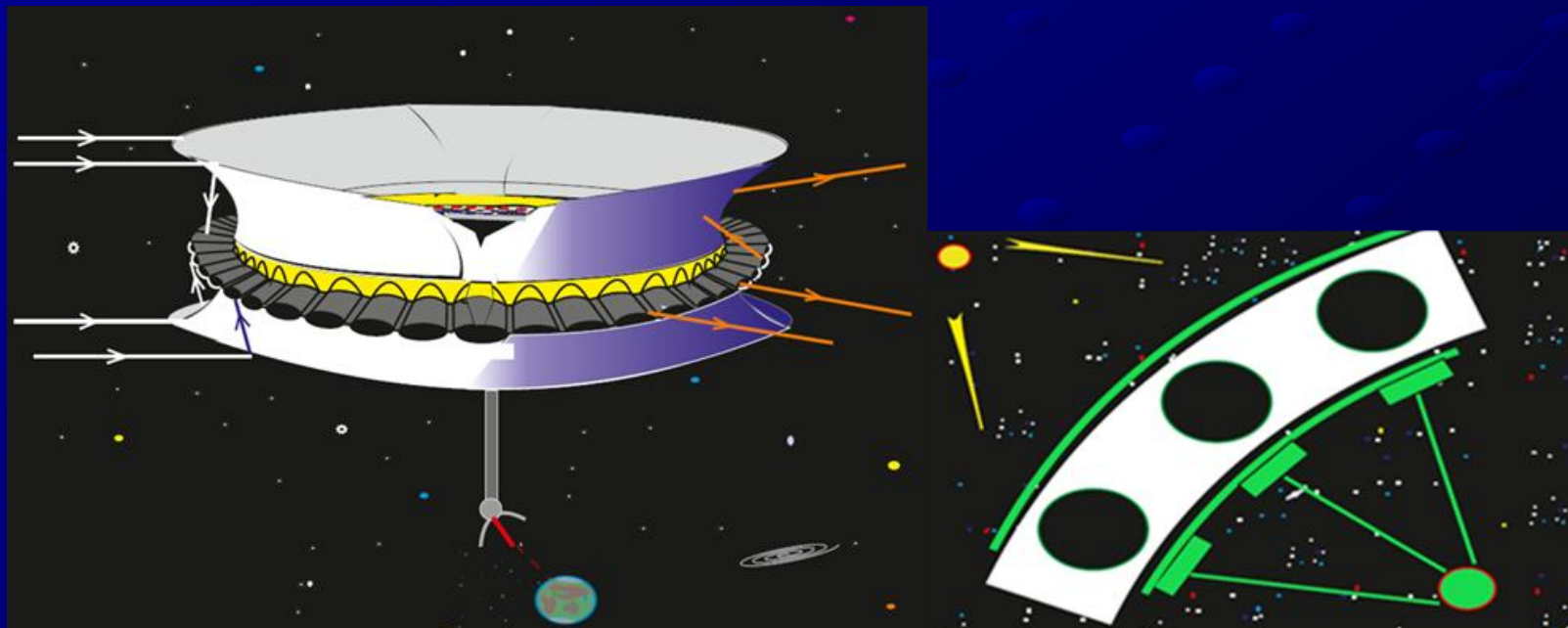
Received February 7, 2019; revised June 12, 2019; accepted August 15, 2019

Abstract—The analysis of solar energy conversion methods in the projects of solar power satellites (SPS) has been conducted and the problems restraining their implementation analysed. Therefore, the article provides grounds for using promising heat-resistant materials of carbonic nanocomposite and low-temperature superconductors in the scheme of solar energy conversion with the purpose of creating SPS projects of a new type with improved weight and size parameters and physical and technical characteristics. The difference between the gyroscopic solar power satellites (GSPSs) with the new thermal conversion system (TCS) and superconductive generator projects and the previous ones lies in the absence of steam and gas turbine plants, a thermal radiator and a system of direction to the sun. The results of assessment of their energy and weight and size parameters have been presented: the thermal efficiency of conversion by the helium as working fluid at concentration of the solar energy of 74 and by the water steam at 38 has made 85% and 62.7% respectively; the specific weight of the entire thermal conversion system has made 2.17 kg/kW and 2.61 kg/kW; its specific capacity – 12.3 and 6.79 kW/m², the specific weight of the GSPS with the new TCS and superconductive generator has made 0.46 and 0.38 kW/kg. The suggested principle of functioning may be used in space power plants, being based on planets and the Moon.

Keywords: gyroscopic solar power satellite, heat conversion module, load-bearing frame, superconducting generator, thermal conversion system

DOI: 10.3103/S0003701X19060070

Використання в енергостанції високотемпературних надпровідників (ВТНП) 2-го покоління, випуск яких вже освоєно, а також жароміцних і легких конструкційних матеріалів з вуглець-вуглецевих композитів [16,17,18,19] значно покращує її енергетичні та масогабаритні показники. Об'єднання високотемпературного теплоприймача знаходяться за тепловим екраном низькотемпературних надпровідних контурів генератора робить можливим в умовах космосу встановлювати необхідний для них температурний режим протягом усього життєвого циклу.

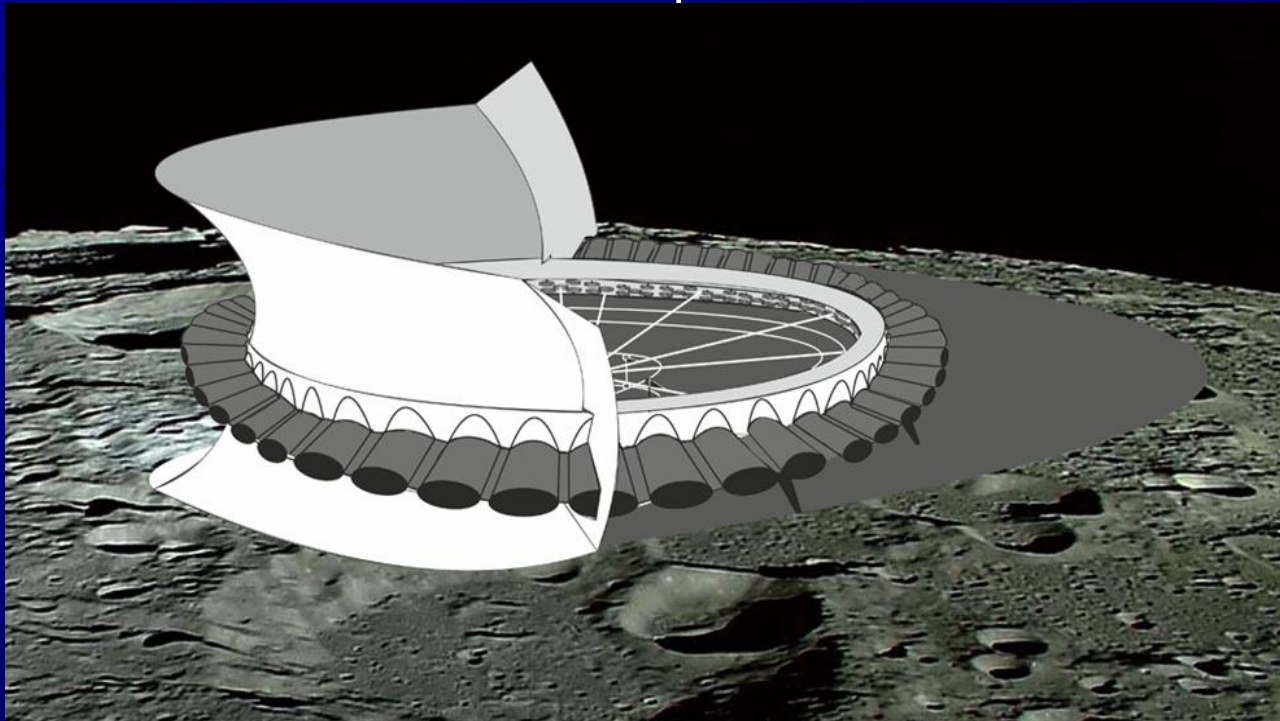


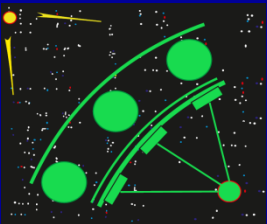
ПРОСКОПІЧНА КОСМІЧНА САНЯЧНА ЕНЕРГОСТАНЦІЯ З НОВОЮ ТЕПЛОВОЮ СИСТЕМОЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА НАДПРОВІДНИКОВИМ ГЕНЕРАТОРОМ

DOI: 10.3103/ S0003701X19060070

АНОТАЦІЯ. Проведено аналіз методів перетворення сонячної енергії в проектах космічних сонячних електростанцій і проаналізовані проблеми, які стримують їх реалізацію. Ефективність функціонування пояснюється її конструктивною особливістю, а також використанням надміцних матеріалів з вуглецевого композиту, прозорого низькоемісійного магнетронного покриття кругової тунельної порожнини «теплової пастки» і високотемпературних надпровідників.

Представлені такі результати оцінки як: термічний ККД перетворення в якості робочого тіла гелію, при концентрації сонячної енергії 74 і водяної пари при концентрації 38 склав 85% і 62,7% відповідно; питома маса всієї системи теплового перетворення склала 2,17 кг·кВт-1 і 2,61 кг·кВт-1; її питома потужність - 12,3 кВт·м-2 і 6,79 кВт·м-2, питома маса енергостанції склала 0,46 кВт·кг-1 і 0,38 кВт·кг-1. Запропонований принцип функціонування може бути використаний на космічних енергостанціях, що базуються на планетах сонячної системи і місяці.





Основні частини конструкції ГКСЕ

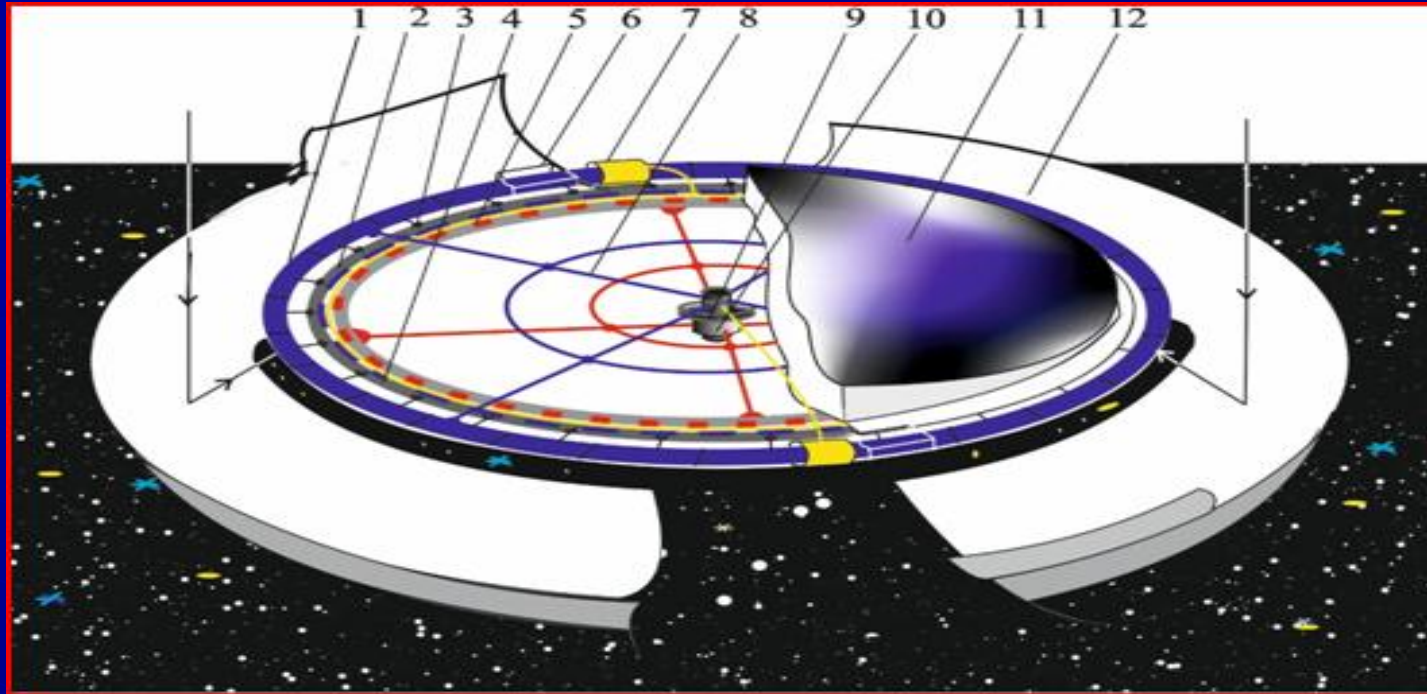
У конструкціях розроблених проектів використовується поєднання виконання функціональних процесів одними і тими ж частинами конструкції в перетворенні енергії повного спектра сонячного випромінювання в механічну і електричну в необхідних співвідношеннях.

Конструкція енергостанції є єдиною архітектурою технічної споруди і складається з 4-х частин:

- перша – це кругова система з теплопретворюючих модулів;
- друга – надпровідний генератор, який є синхронною електричною машиною;
- третя – сонячний концентратор у вигляді неповної кругової параболоциліндричної конструкції;
- четверта – герметичний простір над силовою рамою ГКСЕ з виробничими, технічними та обслуговуючими приміщеннями.



Схеми ГКСЕ з концентраторами



Окремі розрахунки

Час нагріву води від 373K до температури кипіння 558K при $p = 7 \text{ МПа}$ з подальшим випаровування при ізобарно-ізотермічному процесі визначається з рівняння балансу (10) і складає $\tau_1 = 174 \text{ с}$

$$\Phi S \tau_1 = 0,155 \sigma (T_{558}^4 - T_{373}^4) \tau_1 + p \Delta V + r m - \frac{\lambda S_L \Delta T_e}{\Delta x} \tau_1 + c_h m_h \Delta T$$

де 4-й член правої частини вказує на кількість теплоти, що надходить від сполучних елементів між корпусами камер; $\lambda = 36 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ - питома теплопровідність вуглецевого композиту; $S_L = 0,008 \text{ м}^2$ - площа поперечного перерізу елементів; $\Delta T = 600 \text{ К}$ - перепад температур на відстані $\Delta x = 0,01 \text{ м}$; $S = 15 \text{ м}^2$ - площа корпусу камери, на яку падає концентроване сонячне випромінювання через прозоре покриття. Час перегріву пара до 1 278 K визначається зі співвідношення (11) $\tau_2 = 444 \text{ с}$

$$\Phi S \tau_2 = 0,155 \sigma (T_{1273}^4 - T_{560}^4) \tau_2 + p \Delta \bar{V} - \frac{\lambda S_L \Delta T_e}{\Delta x} \tau_2 + \bar{c}_p m \Delta T + c_h m_h \Delta T$$

$\Delta \bar{V} = 3,614 \text{ м}^3$ - обсяг перегрітої пари; $\Delta T = 715 \text{ К}$ - перепад температур.

Охолодження пара до температури конденсації складає $\tau_3 = 65,5 \text{ с}$ визначається з (12)

$$S \tau_3 \sigma (T_{1273}^4 - T_{373}^4) = \bar{c}_p m \Delta T + c_h m_h \Delta T - \bar{p} \Delta V' + \lambda m$$

де $\bar{p} = 35 \cdot 10^5 \text{ Па}$ - середнє значення тиску на ділянці скидання тепла; $S = 30 \text{ м}^2$ - повна площа поверхні камери з сполучними елементами; $V' = 5,56 \text{ м}^3$ - зміна обсягу на ділянці скидання тепла.

$$\text{Потужність теплового перетворювача складає } W = \frac{A}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} = \frac{p \Delta V + \bar{p} \Delta V'}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} = 85,5 \text{ кВт}$$

Другий варіант проекту ГКСЕ

ГКСЕ і складовий плівковий концентратор сонячного випромінювання над теплоприймачем (а), поперечний розріз енергостанції (б) (див. ст.)

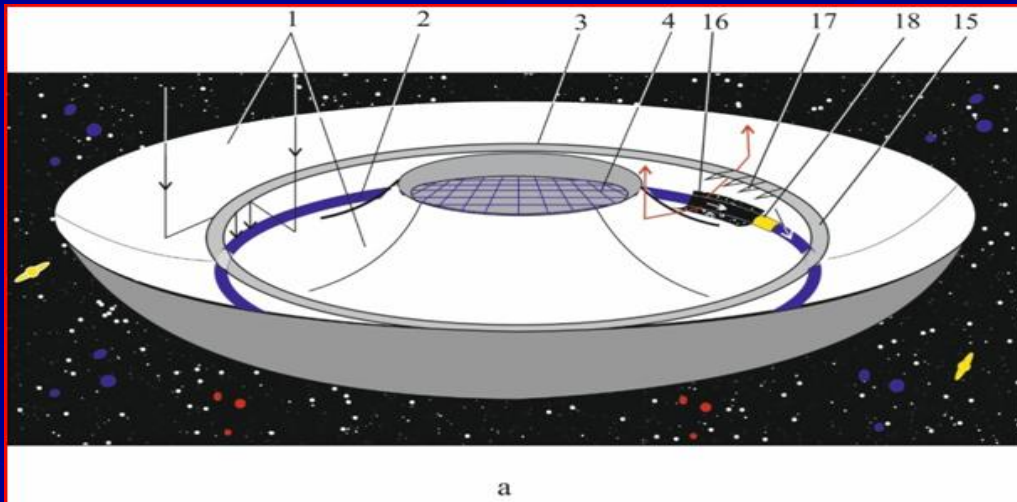


Рис.3. ГКСЕ і складовою плівковий концентратор сонячного випромінювання над теплоприёмником (а), поперечний розріз енергостанції (б)

1- параболоїдний концентратор; 2- контур теплоперетворюючих контурів; 3- параболоїдний відбивач концентрованого сонячного випромінювання; 4- сонячні елементи; 5- теплоперетворюючий модуль; 6- стикувальний вузол кінематичного зв'язку; 7- захисний тепловий екран з фольги; 8- обмотка статора; 9- технологічне приміщення; 10- криостат; 11,12- з'єднання силових рам статора і ротора; 13- контур циркуляції хладону; 14- надпровідникові котушки ротора; 15- контрвідбивач; 16- модулі в тепловипромінюючій зоні (в залежності від розмірів енергостанції таких зон може бути декілька); 17- відбиваюча система для концентрованого сонячного випромінювання, що падає на поверхню «теплової пастки» за

Цикли теплового перетворювача: робоче тіло гелій (А), робоче тіло водяна пара (В)

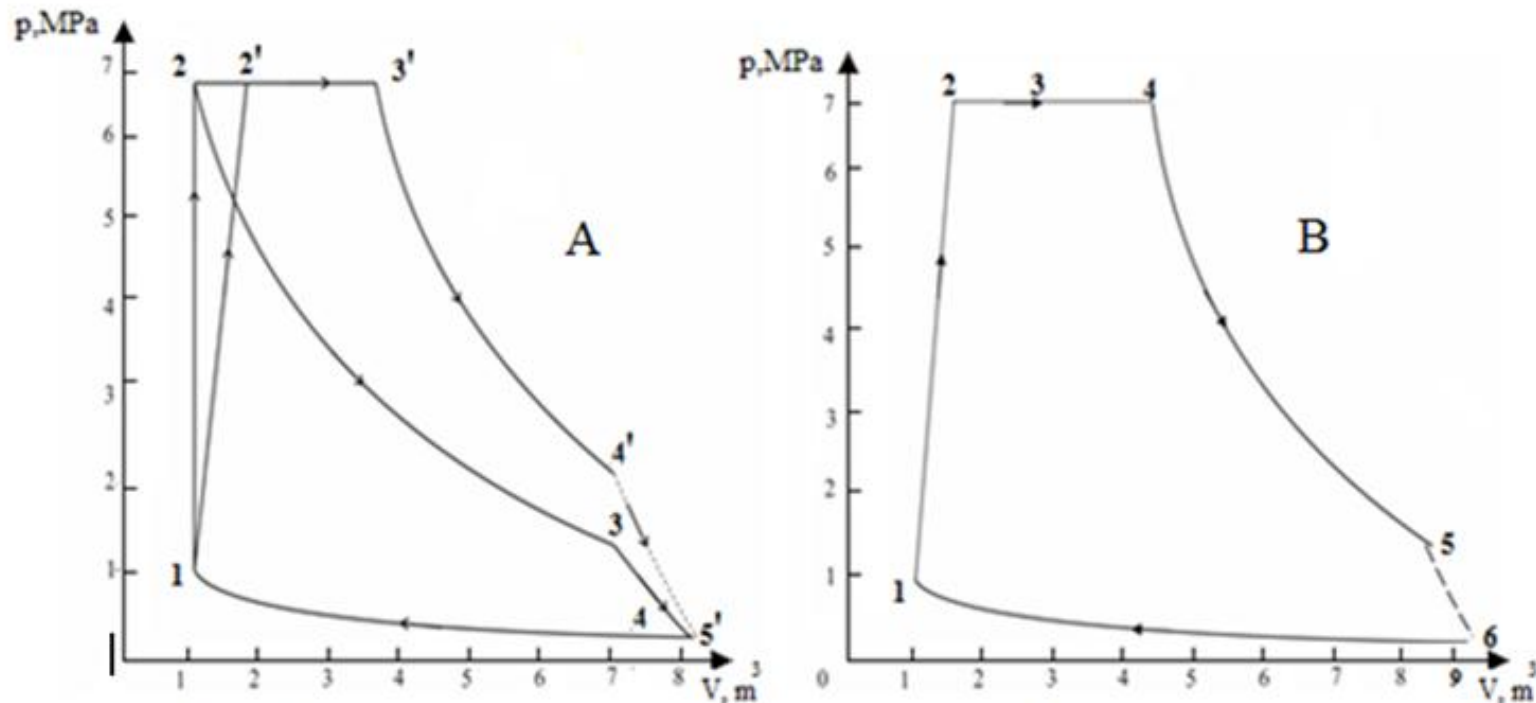


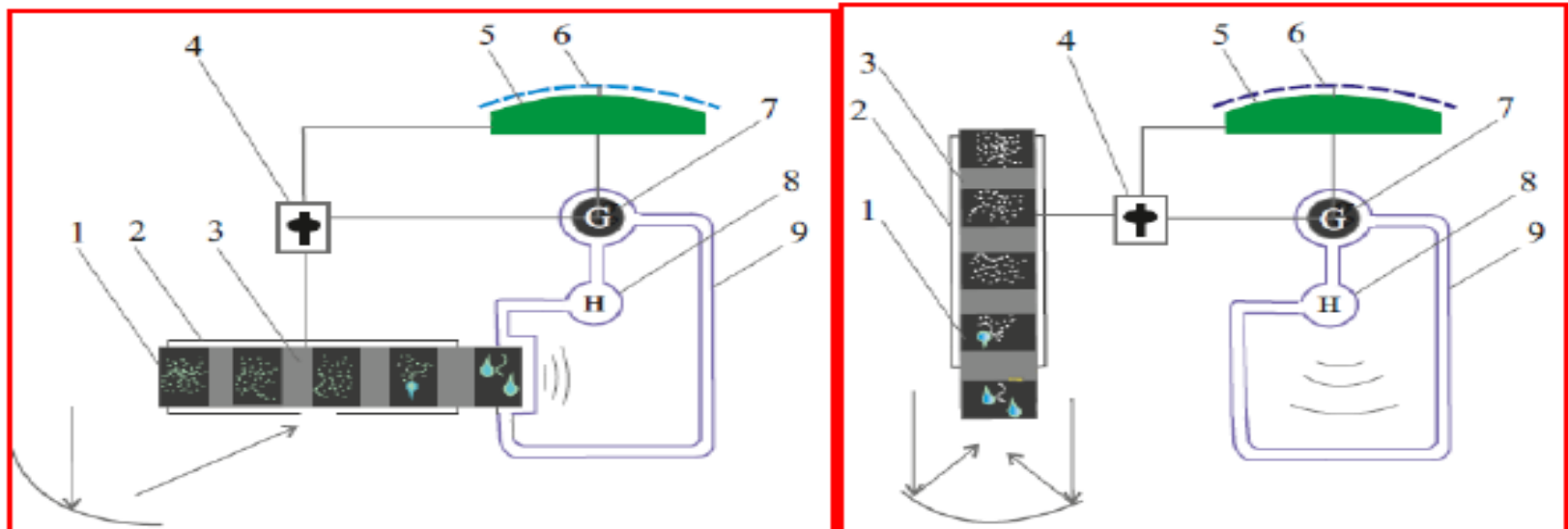
Рис.4. Цикли теплового перетворювача: робоче тіло гелій (А), робоче тіло водяна пара (В)
Fig.4. Cycles of the heat convertor: helium as an actuating medium (A), water steam as an actuating medium (B)

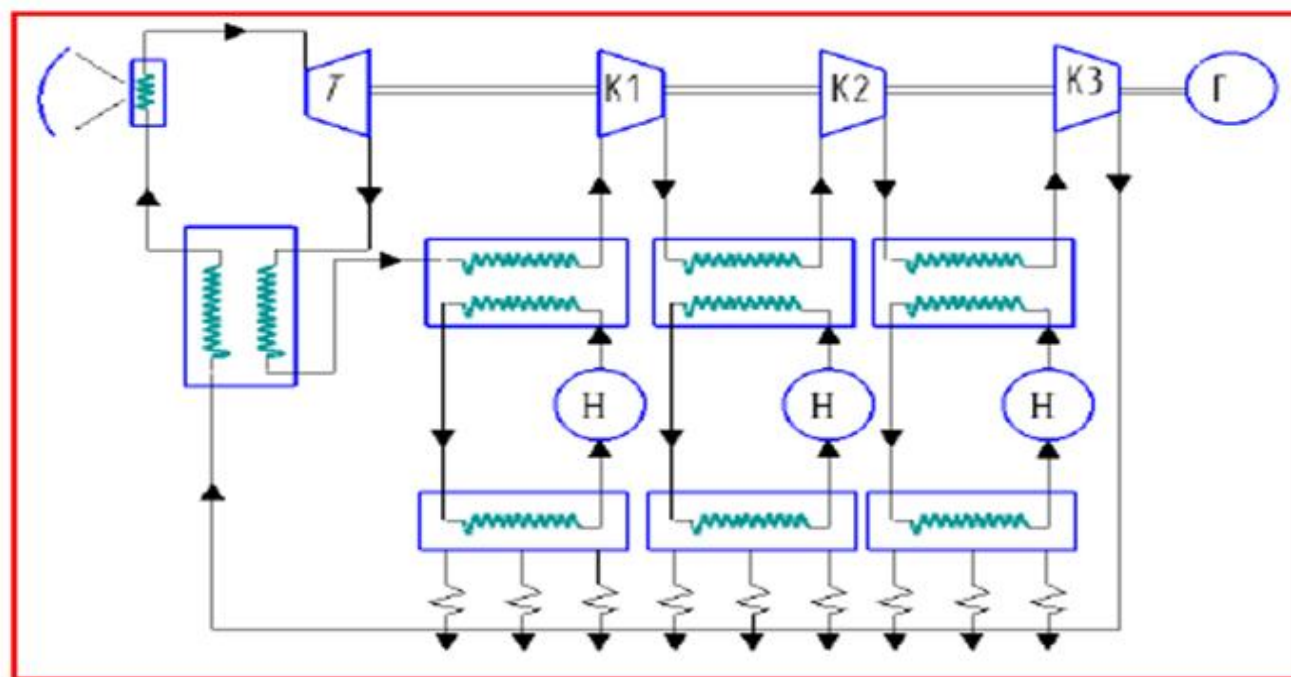
*1-2'-3'-4'-5' варіант робочого циклу теплового перетворювача при високому ступені сонячної концентрації
нахил 1-2' залежить від співвідношення значень навантаження і сонячної концентрації (А)*

1-2 – нагрів води до температури кипіння в точці 2; 2-3 – кипіння при ізобарно-ізотермічному процесі; 3-4 – перегрів пари; 4-5 – інтенсивне скидання тепла на початковій ділянці при більш високій температурі корпусу камери з робочим тілом; 5-6 – завершення конденсації пари в холодильнику; 6-1 – перекид поршня і конденсату в початкове положення і стан (В)

Порівняння схем теплового перетворення GPS (з розверткою теплового теплоприймача двох варіантів) і KCEC

1. Модуль теплоприймача з робочим тілом; 2. Каркас теплової пастки; 3. З'єднальний елемент модулів; 4. Кінематичний перетворювач поступального руху в обертальний; 5. Корпус виробничого і технічного призначення; 6. Фотоперетворювальна поверхня; 7. Надпровідний генератор; 8. Насос; 9. Контур хладагента





В КСЕС теплового перетворення система тепловідводу за масою більше половини загальної маси.

Енергетичні і масогабаритні показники ГКСЕ з новою ТСП і надпровідниковим генератором

Ефективність теплового перетворювача сонячного випромінювання. $W_{t.c.}$, енергетична ефективність надпровідного генератора W_g . і його питомі показники від значень сонячної концентрації

n	30	32	34	36	38	40	42	44	72
Потужність t, с кВт	60	67	73	79.4	85.5	91.5	97.4	103	158
Потужність g, кВт	57	63.6	69.4	74.6	82.2	87.8	93.5	99	152
Питома вага кВт * кг ⁻¹	0.24	0.28	0.3	0.33	0.36	0.38	0.4	0.43	0.66

Енергетичні і масогабаритні показники ГКСЕ з новою ТСП і надпровідним генератором

Рабоче тіло	Гелій	Водяна пара
Сонячна концентрація	74	38
Діаметр ТСП енергостанцій, м	150	150
Кількість і / потужність всіх модулів, МВт	205/11,4	145/12,8
Маса робочого тіла і / модуля, кг	3/118	66/165
Макс. і / мін. температури циклу, К	1300/200	1000/373
Час циклу, с	276	662
ККД перетворення енергії робочим тілом, %	54	С фазовим переходом/без него
		13/17
Термичний КПД, %	85	62,7
Питома вага ТСП, кг·кВт ⁻¹	2,17	2,61
Питома потужність ТСП, кВт·м ⁻²	12,3	6,79
Питома вага енергостанції, кВт·кг ⁻¹	0,47	0,37

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАСС КСЕС І GSPS

Елементи при вихідній потужності електрогенераторів в 1.1 ГВт	Маса, т	Маса GSPS, т в 1,1 ГВт
Система тепловідведення	30960	-
Приймачі випромінювання	9070	876 - 890
Рекуператори і теплообмінники	4380	-
Електрогенератори	4320	993
Фацети	4200	Концентратор 109
Конструкція	2730	78
Турбокомпресори	1950	-
Система охолодження електрогенераторів	820	32
Разом	58430	2102

РОЗВ'ЯЗАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧИ З ВИВОДУ НА НАВКОЛОЗЕМНУ ОРБІТУ GPS



1, 2 - концентратор і теплова пастка плівкових типів з пружними елементами для розгортання з транспортного положення; 3 - теплосприймаючий модуль; 4 - перетворювач рухів; 5 - несуча силова ферма; 6 - електрогенератор.

Розроблений спосіб розміщення частин GPS в корисному об'ємі ракетоносія діаметром 6,36 м і довжиною 13 м дозволяє на орбіті розгорнути її в робочий стан з параметрами: діаметральна відстань між модулями $L = 70$ м, зовнішній діаметр кругового параболоциліндричного концентратора $D=120$ м, внутрішній діаметр параболоциліндричного концентратора $d = 10$ м (де не відбувається прийняття сонячного випромінювання), втрати в тепловипромінювальних зонах «вікнах» $W = 3.2$ МВт, споживана потужність сонячного випромінювання теплоперетворювальною системою $W = 11.74$ МВт.

New Generation Thermodynamic Autonomously Managed Space Solar Power Plant

NEW GENERATION THERMODYNAMIC AUTONOMOUSLY MANAGED

5

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

Матеріал робочого тіла теплового перетворювача сонячної енергії космічного призначення



DOI 10.2412/mmse.90.3.605

Результатом дослідження є розробка методу безперервного отримання корисної механічної енергії за допомогою функціонального матеріалу (робочим тілом) в процесі нагрівання його сонячним випромінюванням в теплопоглинальній зоні і охолодженні в тепловипромінюючій зоні в оптимально розрахунковому діапазоні температур. Проведено теоретичні дослідження на предмет кількісної оцінки потужності металевого сегмента в ролі робочого тіла теплоперетворюючої панелі при функціонуванні теплового перетворювача сонячної енергії (ТПСЕ) космічного призначення.

Запропоновано рішення, що дозволяє значно підвищити ефективність ТПСЕ за допомогою поліпшення фізико-технічних характеристик матеріалу сегмента. Показана перспективність зміни на соті частки одного з серії параметрів, які характеризують матеріал сегмента, призводить до можливості по ефективності конкурувати з фотопреобразуючими системами за умови оптимального поєднання декількох параметрів.

Обмеженість земних енергетичних ресурсів змушує шукати нетрадиційні способи отримання енергії з використанням відновлюваних джерел.

Механізм здійснення безперервної корисної роботи активним середовищем

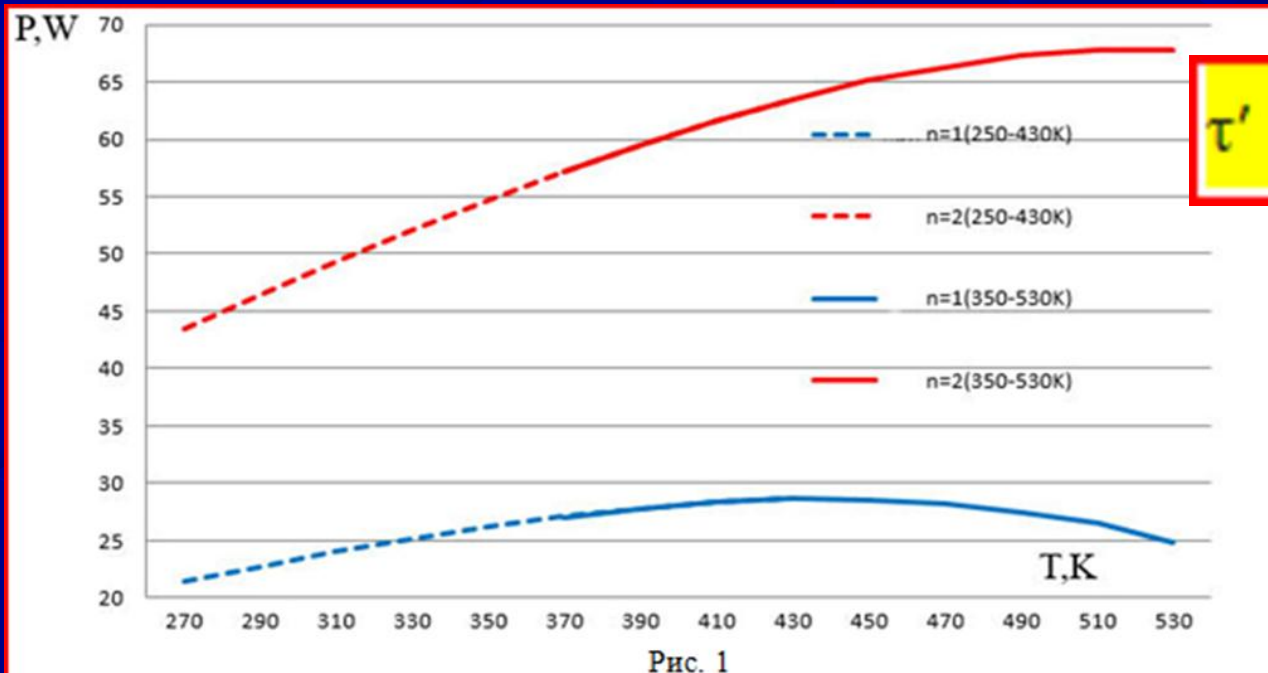
Механізм здійснення безперервної корисної роботи активним середовищем матеріалу (пружною металевою пластиною), що знаходиться в тепловій пастці, полягає в періодичному перетворенні падаючого сонячного випромінювання на її поверхню, яка наближена по теплових властивостях до абсолютно чорного тіла, в наслідок термічного розширення і стиску при охолодженні в зоні затінення по виходу з теплової пастки.

Матеріал сегментів повинен відповідати реалізації основного його функціонального призначення: безперервно здійснювати механічну роботу, мати мінімальну питому теплоємність і щільність, з максимальними значеннями коефіцієнта теплового розширення, модуля пружності при фізичних навантаженнях (стиснення - розтягнення), а ступінь чорноти поверхні пластин наближена до одиниці з можливістю розміщення їх в теплопоглинальній зоні теплової пастки і поза нею в тепловипромінюючій зоні затінення.

Потужність при виконанні сегментом роботи в процесі його нагрівання

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

На рисунку 1 зображені графіки залежності потужності сегментів при нагріванні від значення температур 250 К до 430 К і в більш високому діапазоні температур від 350 К до 530 К відповідно при концентраціях $n = 1$ і $n = 2$.



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

У знаменнику вираження (5) визначення часу охолодження сегмента панелі коефіцієнт 2 свідчить про збільшення в два рази площі тепловипромінюючої поверхні поза теплової пастки в затемненні

Потужність сегмента в процесі тепловипромінювання (охолодження) визначається співвідношенням (6) ілюстрована на рис.2.

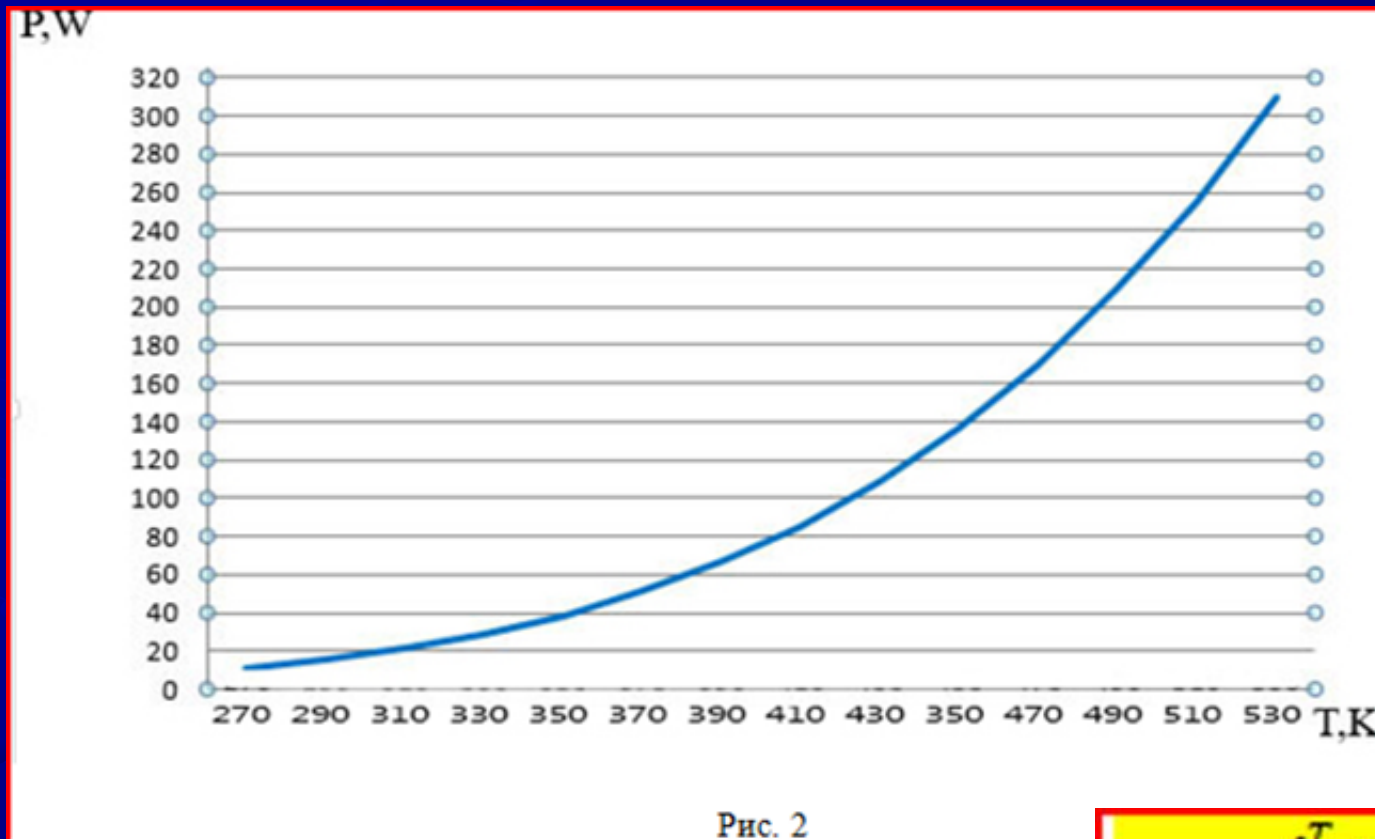
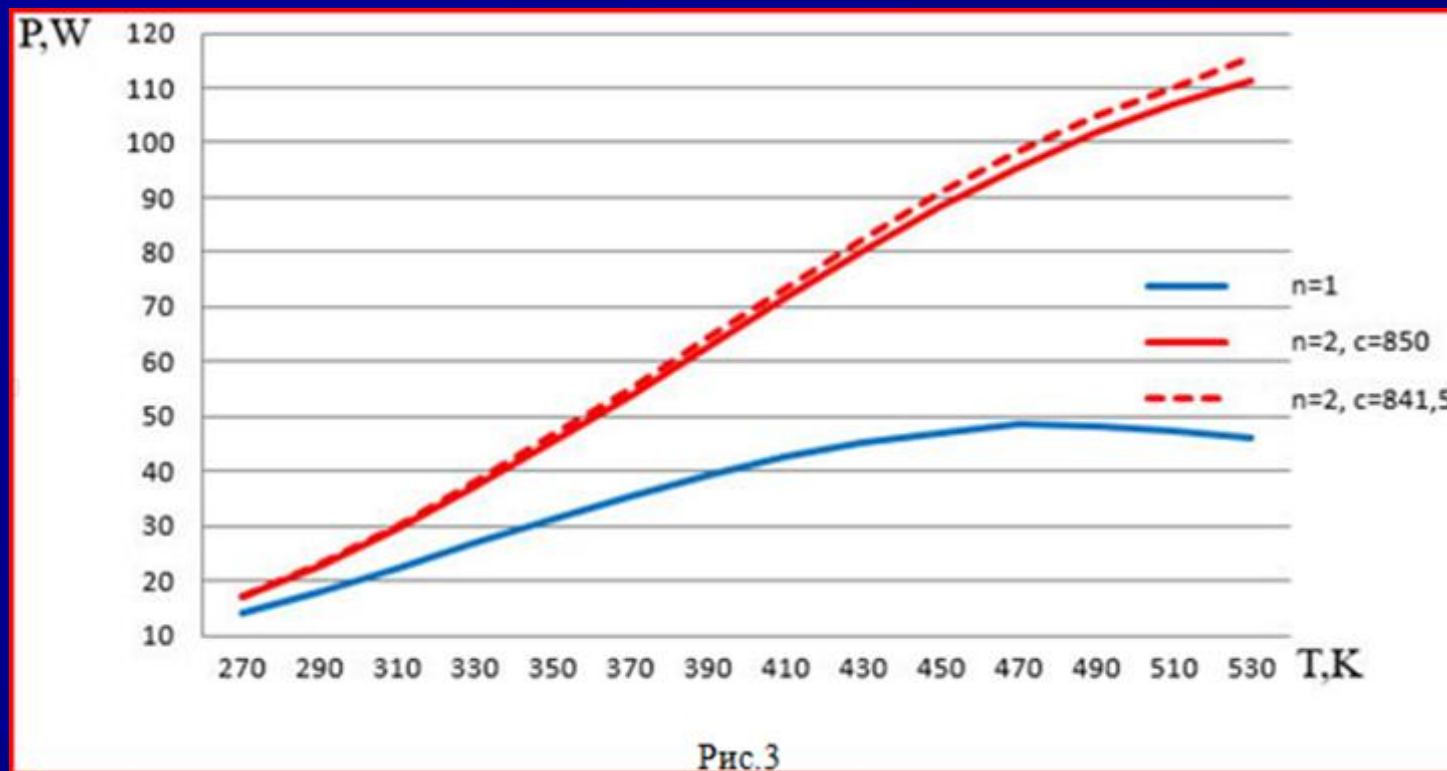


Рис. 2

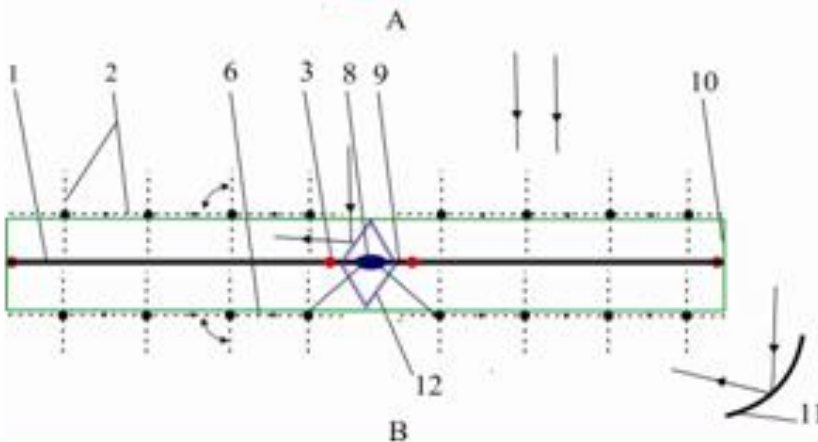
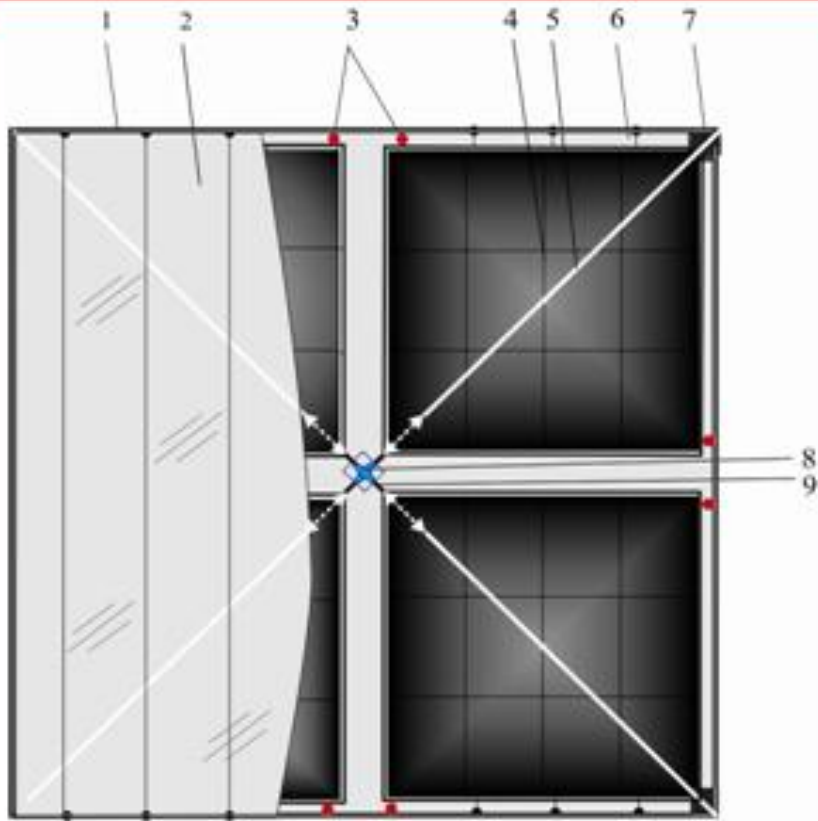
$$P' = \frac{\int_{T_0}^T 2VE\alpha^2 T dT}{\int_{T_0}^T \frac{h(cp - 2E\alpha^2 T)}{2\varepsilon\sigma T^4} dT}.$$

Потужність за один цикл процесу теплопоглинання і тепловипромінювання сегментом визначається виразом (7) і відповідна їй залежність зображена на рис.3.



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

ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ



(1,5) - жорсткий каркас з карбону, його сторони і діагоналі з відбиваючим покриттям служать напрямними для переміщення по ним закінчення сторін (3) площині (4) з теплоперетаючих сегментів активного матеріалу; (2,6) - протилежні поверхні теплової пастки в каркасі (10); (7) - жорстке з'єднання; (8) - двовісний генератор; (9) - штоки генератора; (11) - сонячний концентратор; (12) - відбивач випромінювання.