

УДК 629.78

О критериях оценки массовых и стоимостных характеристик космических фотопреобразователей

В. Ф. Присняков

Дніпропетровський державний університет

Надійшла до редакції 19.02.96

Аналізується дані про зміни в часі коефіцієнтів питомої потужності та питомої вартості сонячних космічних фотоперетворювачів. Пропонуються апроксимаційні формули для їх прогнозу. Пропонується новий критерій, що враховує вартісні та масові характеристики сонячних батарей космічних апаратів.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные элементы появились в 1953 г., когда ощутилась потребность в фотоэлектрическом преобразователе энергии. Однако первое практическое применение показало экономическую нецелесообразность использования такого источника для наземных целей. Появление спутников стимулировало интерес к солнечным элементам вообще и к наиболее изученным тогда кремниевым элементам в частности. Их технология быстро развивалась, и цены на них начали падать. Выделились две ветви развития фотоэлементов: для нужд космической энергетики и для использования в качестве составной части наземной солнечной энергетики. Важнейшими требованиями к фотоэлементам первого направления были как можно большой к. п. д.; повышенная радиационная стойкость; приемлемая удельная мощность (масса солнечных батарей, приходящаяся на единицу генерируемой мощности); как можно меньшая стоимость (в последнее время). Главнейшими критериями создания фотоэлементов для наземных целей были повышенный к. п. д. и дешевизна — низкая удельная стоимость (стоимость производимой единицы мощности энергии).

Необходимо отметить, что космическая энергетика идет по пути увеличения мощности энергоустановок.

Прогноз развития этой мощности (рис. 1) описывается следующей формулой (Prisniakov, 1991):

$$N = 10^{(\tau - \tau_1)/\theta_1}, \quad (1)$$

где $\tau_1 = 1968$ г., $\theta_1 = 11$ лет — постоянная времени процесса увеличения мощности космических энергоустановок (КЭУ). Как видно, например, к 2000 г. ожидается мощность КЭУ порядка тысячи киловатт.

Выход на первые роли стоимостных факторов в космической индустрии потребовал от конструкторов

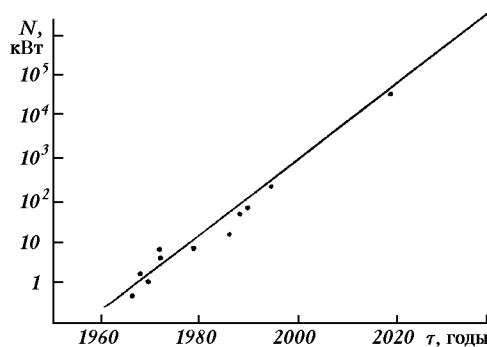


Рис. 1. Развитие мощности космических энергоустановок: точки — мощность имеющихся и проектируемых установок; прямая линия — расчет по формуле $N = 10^{(\tau - 1960)/11}$

ров рассмотрения критериев, основанных прежде всего на двух параметрах: коэффициенте удельной мощности $P_1 = P/m$ и коэффициенте удельной стоимости $C_1 = C/P$ (P — мощность, m — масса, C — стоимость солнечных батарей).

КОЭФФИЦИЕНТ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

К настоящему времени накоплено достаточно большое число данных о величине мощности P_1 , вырабатываемой единицей массы солнечных батарей. Часть из этих данных представлена на рис. 2. Видно, что в первые годы развития космической энергетики на орбите вырабатывалось приблизительно 3 Вт электроэнергии на 1 кг массы фотопреобразователей, а за последующие 20 лет коэффициент P_1 вырос более чем на порядок.

В первом приближении изменение массовых характеристик фотопреобразователей (в основном из кремния) может быть описано следующей формулой:

$$P_1 = P_0 \exp[(\tau - \tau_2)/\theta_2], \quad (2)$$

где $P_0 = 5.6$ Вт/кг; $\tau_2 = 1960$ г.; $\theta_2 = 11.75$ лет — постоянная времени процесса увеличения коэффициента P_1 (близкая к постоянной времени θ_1 увеличения мощности КЭУ).

Коэффициент удельной мощности зависит прежде всего от типа солнечных элементов и материала полупроводникового материала. В последнее время появились новые данные (Goodbody, Kimber, 1995) по величине P_1 для гибких и жестких элементов солнечных космических батарей (мощность 8.7 кВт), изготовленных из различных материалов (см. табл. 1).

В работе Bebermeier et al. (1995) приводятся улучшенные (BOL и EOL) массовые характеристики другого состава фотопреобразователей. Эти характеристики несколько различаются для разных времен существования батарей — 5 лет или 15 лет

Таблица 1. Значение коэффициента P_1 для разных типов элементов и полупроводниковых материалов

Тип элементов	P_1 , Вт/кг	
	Гибкая конструкция	Жесткая конструкция
Si BSR	41.4	32.2
Si BSFR	52.7	25.9
Si HiETA	50	39.5
GaAs/Ge	58	50
GaInP/GaAs/Ge	70	58

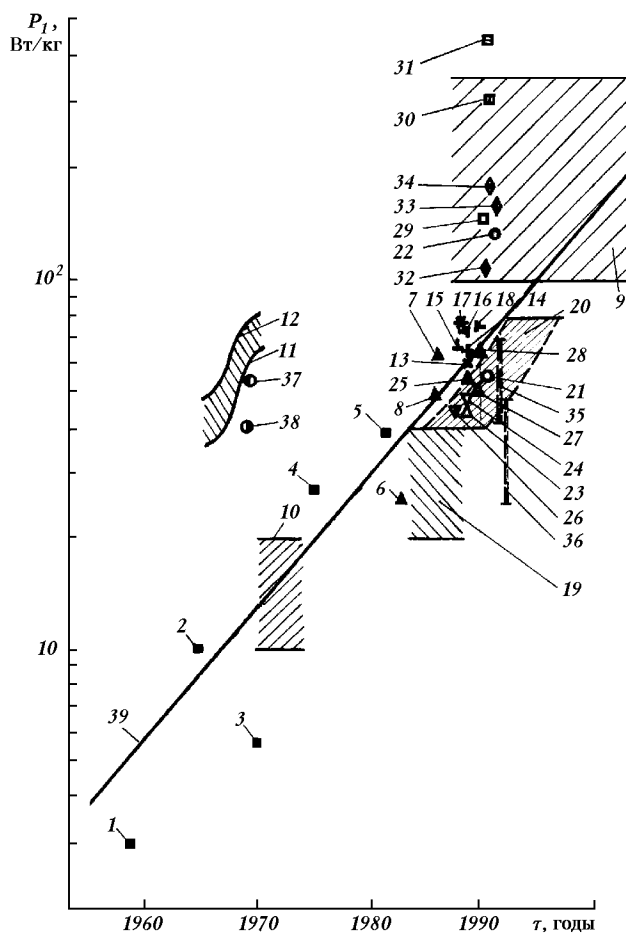


Рис. 2. Изменение экспериментальных значений удельной мощности P_1 для солнечных батарей различных спутников: 1 — Vanguard; 2 — Mariner; 3 — Skylab; 4 — Venus Orbiter; 5 — TDRSS; 6 — Space Telescope; 7 — SEPS (GaAs/Ge); 8 — SEPS (Si); 9 — цель NASA; 10 — данные Квасников, Васильев (1972); 11, 12 — данные прогноза (Luft, Boring, 1968), соответственно для элементов с каптоновым материалом и с чистым каптоном; 13–18 — характеристики улучшенного варианта по программе BOL кремниевых элементов спутника GEO, соответственно (Bebermeier et al., 1995): 8.02R; 2HI-R/200; 2THI-R/100; IOHI-RTA 2/200; IOHI-RTA2/100; GaAs/Ge; 19 — параметры жестких солнечных элементов по данным (Вернов, 1983); 20 — прогноз параметров гибких батарей по (Вернов, 1983); 21, 22 — стандартные кремниевые элементы PPF и EuroSat (Hilgarht et al., 1995); 23–28 — то же, как в 13–18, но по программе EOL; 29–31 — соответственно параметры ультратонких GaAs элементов PPF, EOS, EuroSat (Hilgarht et al., 1995); 32–34 — то же для GaAs/Ge элементов (Hilgarht et al., 1995); 35 — параметры пяти гибких панелей мощностью 8.7 кВт из Si, GaAs/Ge, GaInP/GaAs/Ge (Goodbody, Kimber, 1995); 36 — параметры трех жестких панелей (Goodbody, Kimber, 1995); 37 — тонкопленочные элементы на основе CdS (прогноз Luft, Boring (1968)); 38 — солнечные элементы для лунной базы (ожидаемая величина по прогнозам Robertz, Miller (1969)); 39 — расчет по формуле $P_1 = 5.6 \exp[(\tau - 1960)/11.75]$

Таблица 2. Значение коэффициента P_1 (Вт/кг) для разных элементов и технологий

Тип элемента	5 лет		15 лет		BOL	EOL	Литературный источник
	BOL	EOL	BOL	EOL			
8.02. R	53.5	45	64/60	47.5/43.6			(Bebermeier, 1995)/(Bebermeier et al., 1995)
ZnI—R/200	53	45	63/63.5	47.5/47			(Bebermeier, 1995)/(Bebermeier et al., 1995)
10THI—ETA/200	62	46	75	49			
GaAs/Ge	70	63	74/75	61.5/67			(Bebermeier, 1995)/(Bebermeier et al., 1995)
GaInP/GaAs/Ge	106	93	104	83			
UT—GaAs/100	108.5	93	113	81			
UT—GaAs/200	100	84	101	77			
UT—GaInP/GaAs/10	142/122	—	142.5	102			
2THI—R/100					66	53.5	(Bebermeier et al., 1995)
10Hi—ETA 2/200					73	45.5	(Bebermeier et al., 1995)
10Hi—ETA 2/100					75	51	(Bebermeier et al., 1995)
Si (200 мкм)					65	45	(Ralph, 1995)
Si (67 мкм)					87.7	53.5	(Ralph, 1995)
GaAs/Ge					87	63	(Ralph, 1995)
MJ Cascade (137 мкм)					103	77.5	(Ralph, 1995)
MJ Cascade (137 мкм)					118	88.5	(Ralph, 1995)
Тонкопленочные					89	67.6	(Ralph, 1995)
Тонкопленочные					64	48.3	(Ralph, 1995)

Таблица 3. Значение коэффициента P_1 (Вт/кг) для разных генераторов

Тип солнечного элемента	Тип генератора		
	PPF	EOS	Europe Sat
Стандартный кремний	55	—	135
Сверхтонкие галлий-арсенидовые модули	155	325	480
GaAs/Ge	105	65	175

(для геостационарной орбиты). Большинство данных об коэффициенте P_1 солнечных преобразователей западноевропейского производства сведены в табл. 2. Видно, для времени существования 15 лет характеристики лучше, чем для пятилетнего срока). Сложные по составу полупроводниковые солнечные элементы имеют существенно лучшие (почти в два раза) массовые характеристики.

Представляет интерес и сравнение массовых характеристик по коэффициенту P_1 для различных типов солнечных генераторов. Эти данные сведены в табл. 3 (по Hilgarht, et al., 1995).

УДЕЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ

Если высокая стоимость солнечных элементов была основным препятствием для широкого использования в наземных условиях, то в последнее время требование снижения стоимости выходит на первое место и для космической энергетики. Поэтому проанализируем тенденции снижения стоимости солнечных фотопреобразователей со временем, т. е. с усовершенствованием технологии и увеличением объема производства. На рис. 3 собраны имеющиеся данные о величине коэффициента удельной мощности C_1 . Большой разброс данных объясняется сложностью сведения стоимости в ценах одного какого-то определенного года. Для ряда космических энергоустановок это удалось сделать, и мы имели возможность аппроксимировать зависимость коэффициента C_1 от текущего времени формулой

$$C_1 = C_0 \exp[-(\tau - \tau_2)/\theta_2], \quad (3)$$

где $C_0 = 5.9 \cdot 10^3$ \$/Вт, $\tau_2 = 1960$ г., $\theta_2 = 11.75$ лет.

Удельная стоимость солнечных элементов обычно определяется для единицы производимой мощности. В последнее время ее величина дается по стоимости единицы поверхности солнечных элементов. Это вносит путаницу и вызывает трудности в сравнительной оценке различных типов элементов. Поэтому имеет смысл перейти к комбинации

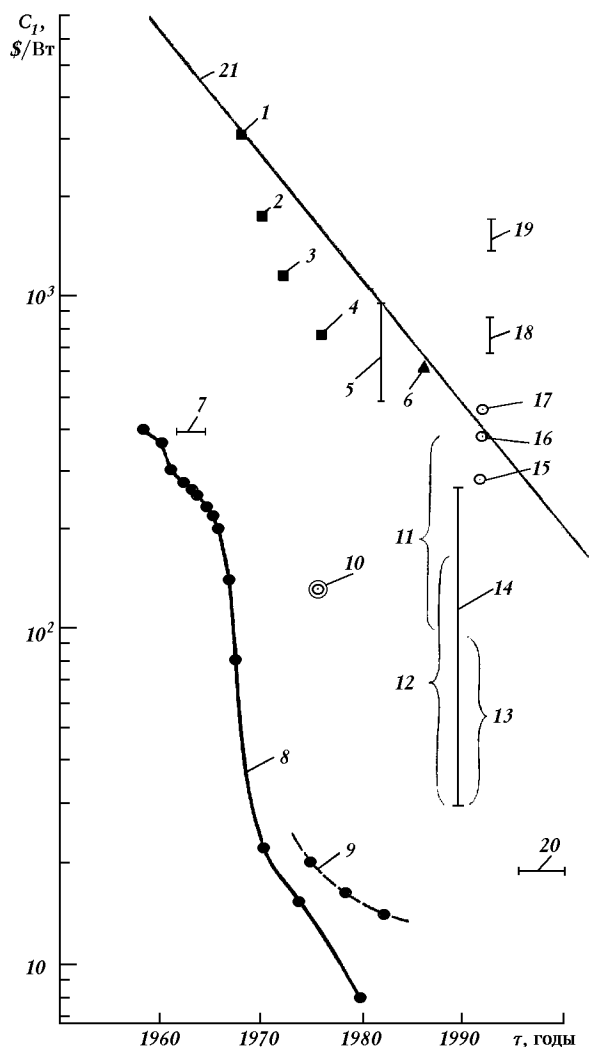


Рис. 3. Изменение удельной стоимости C_1 по опытным данным (Goodbody, Kimber, 1995) по годам для солнечных батарей спутников: 1 — Mariner-67; 2 — Mariner-59; 3 — FRUSA; 4 — Venus Orbiter; 5, 14 — информация о промышленной оценке; 6 — SESP; 7, 8 — кремниевые элементы, соответственно по данным Куландин и др. (1972) и Фаренбрух, Бьюб (1987); 9 — солнечные батареи (Фаренбрух, Бьюб, 1987) (без учета инфляции); 10 — космические солнечные батареи по данным Фаренбрух, Бьюб (1987) (без учета инфляции); 11 — тонкопленочные солнечные батареи; 12 — элементы с концентраторами; 13 — концентратор + тонкопленочные элементы; 15 — тонкопленочные элементы; 16 — Si; 17 — GaAs/Ge; 18 — данные по жестким солнечным батареям Si, GaAs/Ge, GaInP/GaAs/Ge (Goodbody, Kimber, 1995); 19 — данные по тем же солнечным батареям, но в гибком исполнении (Goodbody, Kimber, 1995); 20 — цель NASA по оптимальной величине C_1 ; 21 — расчет по формуле $C_1 = 5.9 \cdot 10^3 \exp[-(\tau - 1960)/11.75]$

Таблица 4. Значения коэффициента V_1 , полученные по данным Goodbody, Kimber (1995)

Тип элементов	V_1 , \$/кг	
	Гибкая конструкция	Жесткая конструкция
Si BSR	71	23
Si BSFR	92.1	28.5
Si HiETA	90.3	35.2
GaAs/Ge	90	47.1
GaInP/GaAs/Ge	104	53.3

Таблица 5. Значения коэффициента V_1 для различных типов элементов, полученные по оценочным и расчетным данным (Ralph, 1995)

Тип элемента	V_1 , \$/кг		
	Оценочные данные	Расчеты	
		BOL	EOL
Si 200 мкм	21.6	19.5	19.5
Si 67 мкм	128.2	26.3	26.3
GaAs/Ge 137 мкм	111	42.1	42.1
MJ Cascade 137 мкм	133	47.4	47.6
MJ Cascade 137 мкм	139	49	49.1
Тонкопленочный	100	22.5	22.7
Тонкопленочный	100	22.6	22.6

рассмотренных критериев P_1 и C_1 , точнее к их производству, определяющему стоимость единицы массы элемента:

$$V_1 = P_1 C_1 \quad (4)$$

Величину V_1 можно найти после подстановки в выражение (4) формул (2) и (3):

$$V_1 = P_0 C_0 \approx 3.3 \cdot 10^4 \text{ $/кг.} \quad (5)$$

Получился в определенной степени парадоксальный результат: коэффициент удельной стоимости массы солнечных элементов изменяется в основном только вследствие инфляции, оставаясь для определенного типа материала на протяжении длительного времени постоянной величиной.

Представленный выше результат по величине V_1 относится в основном к кремниевым элементам жесткой конструкции. Значения коэффициента V_1 для различных составов солнечных элементов, различных конструкций и задач приведены нами в табл. 4 и 5. Заметим, что данные, приведенные в табл. 4, получены по параметрам 8.7 кВт солнеч-

ной батареи для спутника LEO при пятилетнем функционировании (Goodbody, Kimber, 1995). Видно, что гибкая конструкция более чем в два раза дороже, чем жесткая. Отметим, что для гибкой конструкции $V_1 \approx 9 \cdot 10^4$ \$/кг.

Анализ данных, представленных в табл. 5, показывает, что в стоимостном отношении переход к тонкопленочным элементам существенно дешевле, чем использование каскадных модулей или элементов на основе GaAs/Ge.

Использование критерия V_1 в ряде случаев более целесообразно, чем критериев C_1 и P_1 . Например, оценка эффективности перехода к GaAs/Ge-элементам дает увеличение к. п. д. в 1.5 раза, но при увеличении стоимости 1 кг в два раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ позволяет прогнозировать развитие массово-стоимостных характеристик солнечных элементов, используемых в КЭУ. Предложенные аналитические зависимости дают возможность оценивать массовые и стоимостные коэффициенты будущих установок. Накопление данных по величине коэффициентов P_1 , C_1 , V_1 позволит более корректно выбирать проектные параметры космических объектов.

Вернов С. Н. (ред.) Модель космического пространства. — М.: МГУ, 1983.—Т. 2. Моделирование воздействия космической среды.—770 с.

Квасников А. В., Васильев Ю. Б. Энергетические установки, электрореактивные космические двигательные установки. — М.: МАИ, 1972.—90 с.

Куландин А. А., Тимашев С. В., Иванов В. П. Энергетические системы космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1972.—428 с.

Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных бата-

рей / Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. — М.: Энергоатомиздат, 1983.—360 с.

Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. — М.: Энергоатомиздат, 1987.—280 с.

Bebermeier H. 5mm GaAs- module and Solar array technology // Proc. ESA SP-369, Sept. 1995.—Vol. 2.—P. 505—508.

Bebermeier H., Rasch R., Fernandez E., et al. Advanced Silicon Solar cells: HI-ETA Pilot line and High fluence particle irradiation Tests // Proc. European Space Power Conf., Poitiers, France, 4—8 Sept., 1995.—Vol. 2.—P. 462—470.

Robertz I. E., Miller I. L. Advanced desing modules for lunar Surface array power systems, Santa Monica, California, IEGEG, 1969.

Goodbody C., Kimber R. The Defence Research Agency Photovoltaic Programme // World Solar Summit High Efficiency Solar Generators Workshop; Sophia Antipolis, France, 30—31 October, 1995.

Hilgarth J., Brann M., Frese Y., et al. Integral thin film GAAS Solar Cell modules with integrated protection diodes // Proc. European Space Power Conf., Poitiers, France 4—8 Sept., 1995. — 1995.—Vol. 2.—P. 459—462.

Prisniakov V. SPS interest and Studies in USSR, Second Intern. Symp., SPS 91 "Power from Space", Paris, 27—30 August 1991.—P. 36—44.

Luft W., Boring R. A. TRW Systems Group, IECEC, 1968.

Ralph E. L. High efficiency Solar Cell Arrays System Trade-offs World Solar Summit, High Efficiency Solar Generators Workshop, Sophia Antipolis, France, 30—31 Oct., 1995.

Yamaguchi M. Prospects of Super High Efficiency Solar, Cells and Japanese Programs of Them // World Solar Summit, High Efficiency Solar Generators Workshop, Sophia Antipolis, France, 30—31 Oct., 1995.

ON CRITERIA FOR ESTIMATING THE MASS AND COST CHARACTERISTICS OF PHOTOCONVERTERS USED IN SPACE VEHICLES

V. F. Prisniakov

Data on temporal changes in the specific power coefficient and specific cost of solar photoconverters used in space vehicles is analyzed. Approximation formulae for forecasting the changes are suggested. A new criterion that takes into account the cost and mass characteristics of spacecraft solar batteries is proposed.