

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАСКАДНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

---

Юрий Борисович ВАСИЛЬЕВ родился в 1938 г. в поселке Сеша Дубровского р-на Орловской области. Ведущий научный сотрудник НИИ прикладной механики и электродинамики МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области систем преобразования энергии, систем энергоснабжения космических аппаратов, солнечной энергетики. Автор 49 научных работ. E-mail: riame@sokol.ru

Yury B. VASILYEV, Ph.D., was born in 1938, in Orel region. He is a Principal Research Associate at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of MAI and Associate Professor at the MAI. His research interests are in energy conversion, spacecraft power systems, solar power engineering. He has published 49 technical papers. E-mail: riame@sokol.ru

---

Ленина Серафимовна ГАЦЕНКО родилась в селе Монастырище Уссурийской области Приморского края. Старший научный сотрудник ФГУП НИИ «Квант». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области солнечных батарей, космических аппаратов. Автор 35 научных работ. E-mail: riame@sokol.ru

Lenina S. GATSENKO, Ph.D., was born in Primorsky territory. She is a Senior Research Associate at the KVANT Research Institute. Her research interests are in solar arrays, spacecraft. She has published 35 technical papers. E-mail: riame@sokol.ru

---

Константин Викторович ЕВДОКИМОВ родился в 1944 г. в городе Омске. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области солнечной энергетики, фотоэлектрических преобразователей. Автор 37 научных работ. E-mail: riame@sokol.ru

Konstantin V. EVDOKIMOV, Ph.D., was born in 1944, in Omsk. He is an Associate Professor at MAI. His research interests are solar power engineering, photoelectric transducers. He has published 37 technical papers. E-mail: riame@sokol.ru

---

Виктория Витальевна СВОТИНА родилась в городе Москве. Старший научный сотрудник НИИ прикладной механики и электродинамики МАИ. Основные научные интересы — в области космических аппаратов, фотоэлектрических преобразователей, электрических ракетных двигателей. Автор 75 научных работ. E-mail: riame@sokol.ru

Victoria V. SVOTINA was born in Moscow. She is a Senior Research Associate at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of MAI. Her research interests are spacecraft, photoelectric transducers, electric thrusters. She has published 75 technical papers. E-mail: riame@sokol.ru

---

Юрий Алексеевич СЕМЕНОВ родился в 1985 г. в городе Москве. Инженер НИИ прикладной механики и электродинамики МАИ. Основные научные интересы — в области космических аппаратов, солнечной энергетики. Автор одной научной работы. E-mail: riame@sokol.ru

Yury A. SEMENOV, was born in 1985, in Moscow. He is an Engineer at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of MAI. His research interests are in spacecraft, solar power engineering. He has published 1 technical paper. E-mail: riame@sokol.ru

---

*В работе рассматриваются каскадные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и эксплуатационные характеристики арсенид-галлиевых гетероструктур, предназначенные для использования на космических аппаратах (КА). Представлена разработанная физико-математическая модель каскадного ФЭП.*

*Cascade photoelectric transducers are presented as well as operational performances of GaAs heterostructures intended for spacecraft. A physical and mathematical model is suggested for cascade photoelectric transducers.*

**Ключевые слова:** каскадные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), арсенид-галлиевые гетероструктуры, физико-математическая модель.

**Key words:** cascade photoelectric transducers, GaAs heterostructures, physical and mathematical model.

## Введение

Одним из важнейших факторов, определяющих успешное освоение космического пространства, является уровень развития бортовых энергетических систем и установок КА. При этом решающая роль отводится космическим энергетическим установкам с преобразованием солнечной энергии.

Основными требованиями к параметрам и конструкции этих установок являются:

- повышение коэффициента полезного действия (КПД) ФЭП и удельной мощности солнечных батарей (СБ) — именно этот фактор рассматривается в статье;

- увеличение устойчивости ФЭП и СБ к воздействию факторов космического пространства. Для низких орбит необходимо обеспечить устойчивость к теплоциклам, воздействию атмосферного кислорода и радиации частиц умеренной энергии. Для геостационарной орбиты и высокоэллиптических орбит, проходящих через радиационные пояса Земли, важно добиться устойчивости ФЭП к воздействию частиц высоких энергий.

За 40 лет эксплуатации СБ на КА отработана технология изготовления ФЭП, сборки и контроля качества изготовления СБ. Коэффициент заполнения СБ ФЭП на российских КА доведен до 0,95—0,97. В СБ обычно используются кремниевые ФЭП, КПД которых в настоящее время доведен до 0,14—0,16. Стандартный солнечный элемент (СЭ) имеет размеры  $2 \times 1,2$  или  $2,2 \times 4$  см, толщину 0,25—0,45 мм, ЭДС отдельного СЭ в среднем на околоземной орбите составляет 0,5—0,55 В при удельной массе 2,6—10 кг/м<sup>2</sup> [1]. Исследования показали, что КПД ФЭП может быть увеличена при переходе к каскадным ФЭП, преобразующим в электричество более широкую область солнечного спектра, что уже давно реализуется на зарубежных КА.

## Каскадные фотоэлектрические преобразователи

Идея разделения солнечного спектра на отдельные участки и подбора ФЭП с оптимальной шириной запрещенной зоны для преобразования света от каждого участка нашла свое отражение в создании каскадных ФЭП, состоящих из нескольких расположенных один под другим *p-n*-переходов или других типов разделяющих барьеров с различной шириной запрещенной зоны.

Начиная с 90-х гг. XX века в космической энергетике широко используются ФЭП на базе гетероструктур типа GaInP/GaInAs/Ge, GaInP/GaAs/Ge с теоретическим КПД ФЭП порядка 40—42 %, лабораторным — до 32%. Для промышленно выпускаемых трехкаскадных ФЭП КПД составляет 25—

28%. При этом они обладают повышенной радиационной стойкостью, более низким (~ в 2 раза) температурным коэффициентом деградации мощности по сравнению с кремниевыми ФЭП. Высокий уровень КПД GaAs-структур можно получать на элементах толщиной менее 5—10 мкм, так как арсенид галлия является полупроводником с прямыми межзональными переходами [2].

В настоящее время наиболее отработанными и широко применяемыми являются трехкаскадные ФЭП, которые производятся различными фирмами: Spectrolab (США), Emcore (США), Fraunhofer Institute for Solar Cell Energy System (ФРГ) и т.д. Благодаря большой эффективности такие ФЭП активно используются при создании СБ КА различного назначения. К примеру, одна только фирма Spectrolab (США) ежегодно выпускает трехкаскадные ФЭП, соответствующие электрической мощности более 1400 кВт, из которых более 375 кВт предназначены для КА. Готовится промышленное производство трехкаскадных ФЭП на отечественных предприятиях «Сатурн» (Краснодар) и «Квант» (Москва).

Полупроводниковые материалы, на основе которых создаются трехкаскадные ФЭП, имеют различную ширину запрещенной зоны. Верхний ФЭП, на который падает свет, имеет наибольшее значение ширины запрещенной зоны, вследствие чего он преобразует наиболее коротковолновую часть спектра, пропуская свет с более длинными волнами. Этот ФЭП в настоящее время изготавливается на основе GaInP, который в зависимости от состава обладает шириной запрещенной зоны ~1,75—1,89 эВ. Второй ФЭП, расположенный непосредственно под первым ФЭП и преобразующий в электрическую энергию средней части спектра, обычно создается на основе Ga(In)As. Состав этих материалов подбирается таким образом, чтобы ширина запрещенной зоны второго ФЭП находилась в пределах 1,2—1,4 эВ.

Для создания нижнего ФЭП, преобразующего длинноволновую часть спектра, используется германий, обладающий шириной запрещенной зоны ~0,65 эВ.

Между собой ФЭП соединяются туннельными диодами. Основным требованием, предъявляемым к диоду, является максимальное пропускание не поглощенного в верхнем ФЭП света ко второму ФЭП. Для снижения поглощения был предложен и используется широкозонный туннельный диод, выполненный на основе *p-AlGaAs/n-GaInP*, у которого порог поглощения света составляет 675 нм. Свет с длиной волны меньше этого порога уже поглощен верхним ФЭП.

На освещаемую поверхность ФЭП нанесен антиотражающий слой, поверх которого расположен контакт. На первых трехслойных ФЭП в конце 1990-х годов был достигнут КПД ~22 %, а максимальное значение КПД составляло ~25 % [3].

Для эффективной работы ФЭП необходимо, чтобы значения фототоков, генерируемых в верхнем и среднем слоях, были близки между собой. При согласованных решетках (постоянные кристаллических решеток должны быть равны друг другу) для выполнения этого условия верхний, освещаемый ФЭП должен быть более прозрачен. Этого можно достичь двумя способами: либо увеличить его ширину запрещенной зоны, либо уменьшить его толщину. Первый вариант предпочтительнее, поскольку при этом возрастает напряжение холостого хода в этом слое. Оптимальное значение ширины запрещенной зоны для верхнего слоя, когда он создан на основе GaInP, второй ФЭП — на основе Ga(In)As, а нижний ФЭП — на основе германия, составляет при отсутствии поглощения света атмосферой ~2 эВ. Это значительно выше 1,8 эВ, которое имеется для Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P, при наблюдающемся совпадении постоянных решеток данного соединения с GaAs.

В качестве исходного материала для второго каскада ФЭП часто используется арсенид галлия, который обладает шириной запрещенной зоны 1,424 эВ, что весьма близко к оптимальному теоретическому значению. В этом случае к нижнему (третьему) каскаду ФЭП, создаваемому на основе германия, проходит большое количество света, так что ток, генерируемый в нем, значительно превосходит токи, генерируемые в двух верхних ФЭП, в результате чего вся структура работает не в оптимальном режиме. Для увеличения поглощения во втором каскаде ФЭП в последние годы была изменена ширина запрещенной зоны за счет введения в исходный полупроводник 1—8 % индия. При введении 1 % индия удается повысить напряжение холостого хода на 70 мВ, несмотря на снижение ширины запрещенной зоны на 0,015 эВ. Указанный интервал содержания индия обуславливает низкую концентрацию дефектов и, соответственно, боль-

шое время жизни неосновных носителей, а также согласованность с решеткой германия, являющегося основой нижнего ФЭП.

Между средним и нижним ФЭП располагается обычный туннельный диод. Толщина третьего ФЭП, одновременно являющегося и подложкой, составляет 150—200 мкм. Однако из результатов проведенных исследований следует, что толщину этих ФЭП можно значительно снизить вплоть до 50 мкм.

К настоящему времени на трехкаскадных ФЭП со структурой GaInP/GaInAs/Ge удалось получить высокие значения КПД (табл. 1).

### Физико-математическая модель каскадного ФЭП

В связи с высокой стоимостью изготовления, производства и отработки каскадных ФЭП предлагается проводить предварительное моделирование их выходных характеристик. Для проведения расчетов результирующих параметров ФЭП авторами разработана физико-математическая модель каскадного ФЭП. В модели Солнце представляется в виде сферического абсолютно черного тела радиусом  $R_c = 6,95 \cdot 10^8$  м и температурой поверхности  $T_c = 5760$  К, находящегося на среднем расстоянии  $R_0 = 1,495 \cdot 10^{11}$  м от центра Земли. Спектральный состав солнечного излучения на орбите Земли описывается формулой Планка:

$$I_{\lambda, T_c} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_c}\right) - 1} \left(\frac{R_c}{R_0}\right)^2,$$

где  $\lambda$  — длина волны фотона, м;  $c_1$  — первая радиационная постоянная Планка;  $c_2$  — вторая радиационная постоянная Планка.

В модели не учитываются:

- неравномерность распределений донорных и акцепторных примесей в материалах ФЭП;
- потери на отражение от лицевой поверхности ФЭП; на затенение лицевой поверхности ФЭП контактной сеткой; на рекомбинацию зарядов вне поверхности; потери напряжения на внутреннем сопротивлении полупроводника и в развязывающих диодах.

Таблица 1

КПД трехкаскадных ФЭП

| Фирма                | Высокоэффективные лабораторные СЭ  | Космическое производство, среднее значение |
|----------------------|------------------------------------|--|
| Spectrolab (США)     | 30,5 % (S = 4 см <sup>2</sup> )    | 28,1 % (S = 26,4 см <sup>2</sup> )         |
| Emcore (США)         | 29 % (S = 27,5 см <sup>2</sup> )   | 27,6 % (S = 27,5 см <sup>2</sup> )         |
| Fraunhofer ISE (ФРГ) | 28,6 % (S = 30,2 см <sup>2</sup> ) | 27,8 % (S = 30,2 см <sup>2</sup> )         |
| Sharp (Япония)       | 29,2 % (S = 1 см <sup>2</sup> )    | 28,9 % (S = 27,5 см <sup>2</sup> )         |

Для определения ширины запрещенной зоны, коэффициентов и длин диффузии используются аппроксимированные зависимости, полученные авторами в результате обработки экспериментальных данных.

Распределение концентрации неосновных носителей заряда в  $p$ - и  $n$ -слоях описывается стационарным уравнением диффузии:

$$D_i \frac{d^2 N_i}{dx^2} - D_i \frac{N_i}{L_i^2} + g_0(\lambda) \exp \left( -\kappa E_g^\omega \left( \frac{h\nu}{E_g} - 1 \right) x \right) = 0,$$

где  $N_i$  — концентрация электронов ( $N_e$ ) или дырок ( $N_p$ ) в акцепторном (донорном) полупроводниках,  $M^{-3}$ ;

$x$  — координата, отсчитываемая от лицевой поверхности вглубь полупроводника, м;

$L_i$  — длина диффузии электронов ( $L_e$ ) или дырок ( $L_p$ ) в  $p$ - и  $n$ -полупроводниках, м;

$\nu$  — частота фотона,  $c^{-1}$ .

Для  $n$ -слоя решение имеет вид

$$N_{n_i}(\alpha_i) = \frac{G_{on_i}(\alpha_i)}{\alpha_i^{2\omega_i} - L_{p_i}^{-2}} \times$$

$$\times \left( \frac{(\alpha_i^{\omega_i} z p v_i + 1) \sinh \frac{z t_i - z n_i}{L_{p_i}} + \frac{z p s_i}{L_{p_i}} \cosh \frac{z t_i - z n_i}{L_{p_i}} \exp(-\alpha_i^{\omega_i} z n_i) + \frac{z v p_i}{L_{p_i}} (1 - \alpha_i^{\omega_i} z p s_i) \exp(-\alpha_i^{\omega_i} \times z t_i)}{z n a_i} - \exp(-\alpha_i^{\omega_i} z n_i) \right),$$

где

$$z n a_i = \left[ \left( 1 + z p s_i \frac{z p v_i}{L_{p_i}^2} \right) \sinh \left( \frac{z t_i - z n_i}{L_{p_i}} \right) + \left( \frac{z p s_i + z p v_i}{L_{p_i}} \right) \cosh \left( \frac{z t_i - z n_i}{L_{p_i}} \right) \right];$$

Аналогично для  $p$ -слоя

$$N_{p_i}(\alpha_i) = \frac{G_{op_i}(\alpha_i)}{\alpha_i^{2\omega_i} - L_{e_i}^{-2}} \left( \frac{(\alpha_i^{\omega_i} z n s_i + 1) \frac{z v n_i}{L_{e_i}} + (1 - \alpha_i^{\omega_i} z n v_i) \exp \frac{-\alpha_i^{\omega_i} z p_i}{L_{e_i}} \sinh \frac{z p_i}{L_{e_i}} + \frac{z n s_i}{L_{e_i}} \cosh \frac{z p_i}{L_{e_i}}}{z p a_i} - \exp(-\alpha_i^{\omega_i} z p_i) \right),$$

где

$$z p a_i = \left[ \left( 1 + z n s_i \frac{z n v_i}{L_{e_i}^2} \right) \sinh \left( \frac{z p_i}{L_{e_i}} \right) + \left( \frac{z n s_i + z n v_i}{L_{e_i}} \right) \cosh \left( \frac{z p_i}{L_{e_i}} \right) \right].$$

Спектральные и интегральные плотности тока равны:

для  $n$ -слоя:

$$J_{n_i}(a_i) = e V_p N_{n_i}(\alpha_i), \quad J_{n_i} = \int_0^\infty J_{n_i}(a_i) da_i;$$

для  $p$ -слоя:

$$J_{p_i}(a_i) = e V_e N_{p_i}(\alpha_i), \quad J_{p_i} = \int_0^\infty J_{p_i}(a_i) da_i.$$

Максимальный ток на орбите Земли определяется зависимостями:

$n$ -слой:

$$J_{nm_j}(\alpha_i) = 3422 \times e g_i^3 (\alpha_i + 1)^2 \frac{(\exp(-\alpha_i^{\omega_i} z n_i) - \exp(-\alpha_i^{\omega_i} z t_i)) \delta_i \chi_i}{\exp(2e g_i (\alpha_i + 1)) - 1},$$

$$J_{nm_i} = \int_0^\infty J_{nm_i}(a_i) da_i;$$

$p$ -слой:

$$J_{pm_j}(\alpha_i) = 3422 \times eg_i^3 (\alpha_i + 1)^2 \frac{(1 - \exp(-|\alpha_i^{\omega_i}| zp_i)) \delta_i \chi_i}{\exp(2eg_i(\alpha_i + 1)) - 1},$$

$$J_{pm_i} = \int_0^{\infty} J_{pm_i}(a_i) da_i.$$

Ток  $p$ - $n$ -перехода

$$J_{pnm_j}(\alpha_i) = 3422 \times eg_i^3 (\alpha_i + 1)^2 \times \frac{(\exp(-\alpha_i^{\omega_i} zp_i) - \exp(-\alpha_i^{\omega_i} zn_i)) \delta_i \chi_i}{\exp(2eg_i(\alpha_i + 1)) - 1},$$

$$J_{pnm_i} = \int_0^{\infty} J_{pnm_i}(a_i) da_i.$$

Полные плотности генерируемого и максимального токов  $i$ -го каскада рассчитываются как сумма плотностей токов в  $p$ - и  $n$ -слоях и  $p$ - $n$ -переходе:

$$J_{s_i}(\alpha_i) = J_{p_i}(\alpha_i) + J_{n_i}(\alpha_i) + J_{pnm_i}(\alpha_i);$$

$$J_{s_i} = \int_0^{\infty} J_{s_i}(a_i) da_i;$$

$$J_{sm_i}(\alpha_i) = J_{pm_i}(\alpha_i) + J_{nm_i}(\alpha_i) + J_{pnm_i}(\alpha_i);$$

$$J_{sm_i} = \int_0^{\infty} J_{sm_i}(a_i) da_i.$$

Напряжение холостого хода равно

$$U_{xxi} = 8,62 \cdot 10^{-5} T \ln \left( \frac{J_{s_i}}{J_{0_i}} + 1 \right).$$

Таблица 2

Расчетные значения электрических параметров ФЭП

| Температура, К   | 280     | 300     | 320     | 340     | 360     |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Плотность рабочего тока, А/м <sup>2</sup>              | 214,748 | 211,394 | 205,318 | 193,344 | 166,801 |
| Плотность тока короткого замыкания, А/м <sup>2</sup> . |         |         |         |         |         |
| первый каскад  | 215,462 | 217,688 | 220,100 | 222,500 | 224,948 |
| второй каскад  | 256,644 | 256,708 | 256,838 | 256,995 | 257,189 |
| третий каскад  | 281,223 | 283,060 | 284,872 | 286,653 | 288,407 |
| Рабочее напряжение, В                                  |         |         |         |         |         |
| первый каскад  | 0,943   | 0,896   | 0,850   | 0,803   | 0,756   |
| второй каскад  | 0,597   | 0,552   | 0,507   | 0,461   | 0,416   |
| третий каскад  | 0,162   | 0,121   | 0,081   | 0,045   | 0,013   |
| Рабочее напряжение, В                                  |         |         |         |         |         |
| двух каскадов  | 1,540   | 1,448   | 1,356   | 1,264   | 1,172   |
| трех каскадов  | 1,703   | 1,569   | 1,437   | 1,309   | 1,185   |
| Напряжение холостого хода, В                           |         |         |         |         |         |
| первого каскада  | 1,008   | 0,963   | 0,918   | 0,872   | 0,826   |
| второго каскада  | 0,652   | 0,607   | 0,561   | 0,515   | 0,468   |
| третьего каскада                                       | 0,188   | 0,140   | 0,092   | 0,049   | 0,018   |
| Напряжение холостого хода, В                           |         |         |         |         |         |
| двух каскадов  | 1,660   | 1,570   | 1,479   | 1,386   | 1,294   |
| трех каскадов  | 1,848   | 1,710   | 1,571   | 1,435   | 1,312   |
| Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>                   |         |         |         |         |         |
| первого каскада  | 197,978 | 189,484 | 180,905 | 172,072 | 163,047 |
| второго каскада  | 126,995 | 116,731 | 106,483 | 96,249  | 86,060  |
| третьего каскада                                       | 36,024  | 25,510  | 15,625  | 6,998   | 1,024   |
| Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>                   |         |         |         |         |         |
| двух каскадов  | 324,972 | 306,215 | 287,388 | 268,321 | 249,107 |
| трех каскадов  | 360,997 | 331,724 | 303,012 | 275,319 | 250,132 |
| КПД  |         |         |         |         |         |
| первого каскада  | 0,143   | 0,136   | 0,130   | 0,124   | 0,117   |
| двух каскадов  | 0,234   | 0,220   | 0,207   | 0,193   | 0,179   |
| трех каскадов  | 0,260   | 0,239   | 0,218   | 0,198   | 0,180   |

Рабочее напряжение каскада рассчитывается из условия максимальной мощности.

Плотность рабочего тока каскада

$$J_i = J_{sj} - J_{0i} \exp\left(\frac{11603U}{T} - 1\right).$$

Удельная мощность каскада  $P_i = U_i J_i$ . Суммарная удельная мощность ФЭП равна  $P = \sum P_i$ .

Суммарное рабочее напряжение и напряжение холостого хода рассчитывается по формулам

$$U = \sum U_i, U_{xx} = \sum U_{xx_i}.$$

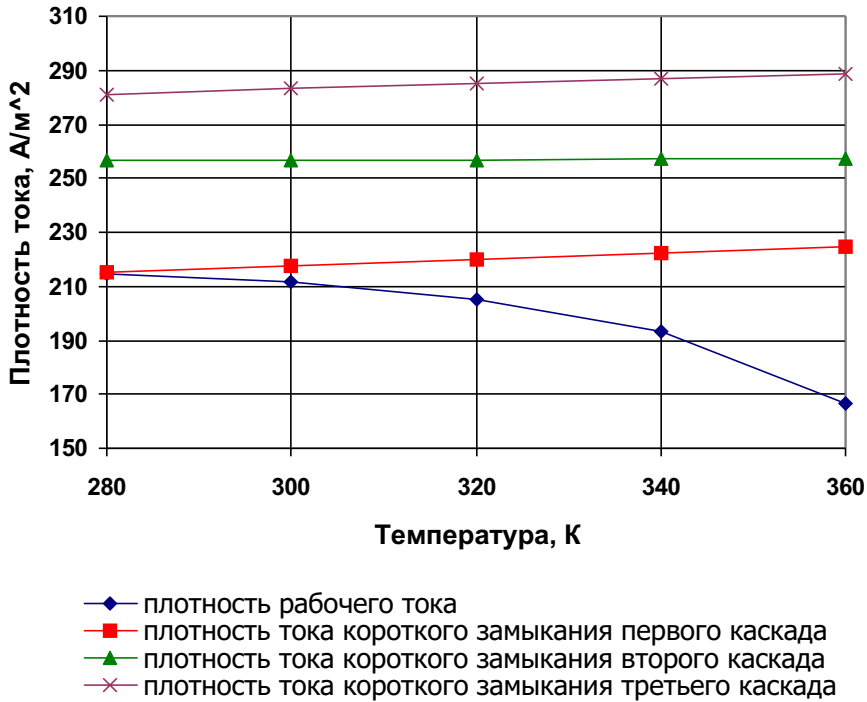


Рис. 1. Зависимость плотностей тока каскадных ФЭП от температуры

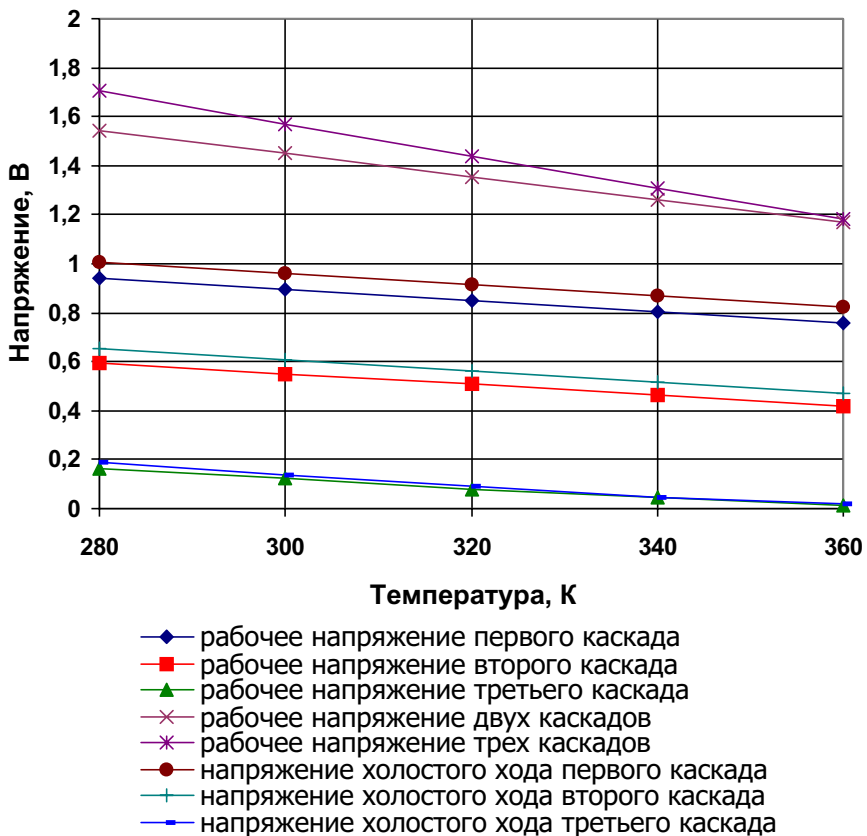


Рис. 2. Зависимость напряжения от температуры ФЭП

КПД каскадного ФЭП  $\eta = \frac{P}{\int_0^{\infty} I_{\lambda,0} d\lambda}$ .

В табл. 2 и на графиках (рис. 1—4) представлены результаты моделирования каскадного ФЭП при оптимальных по рабочему току толщинах каскадов:

GaAs — 0,140 мкм, Si — 82 мкм и Ge — 250 мкм для различных равновесных температур.

**Выводы**

Из представленных результатов видно, что расчет с использованием разработанной модели соответствует физическим закономерностям поведения ФЭП при изменении его рабочей температуры. По-

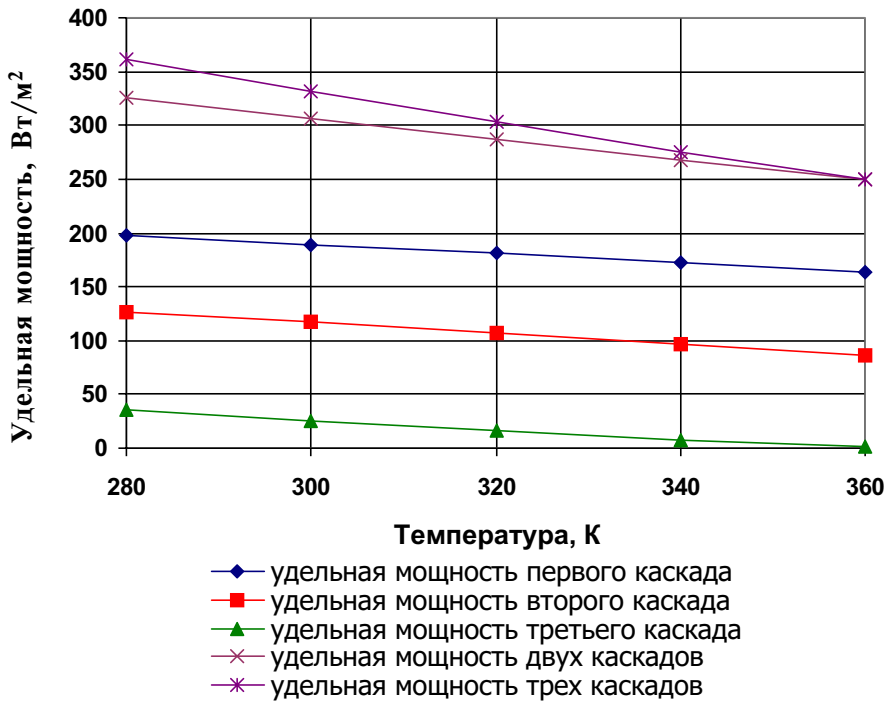


Рис. 3. Зависимость удельной мощности ФЭП от температуры

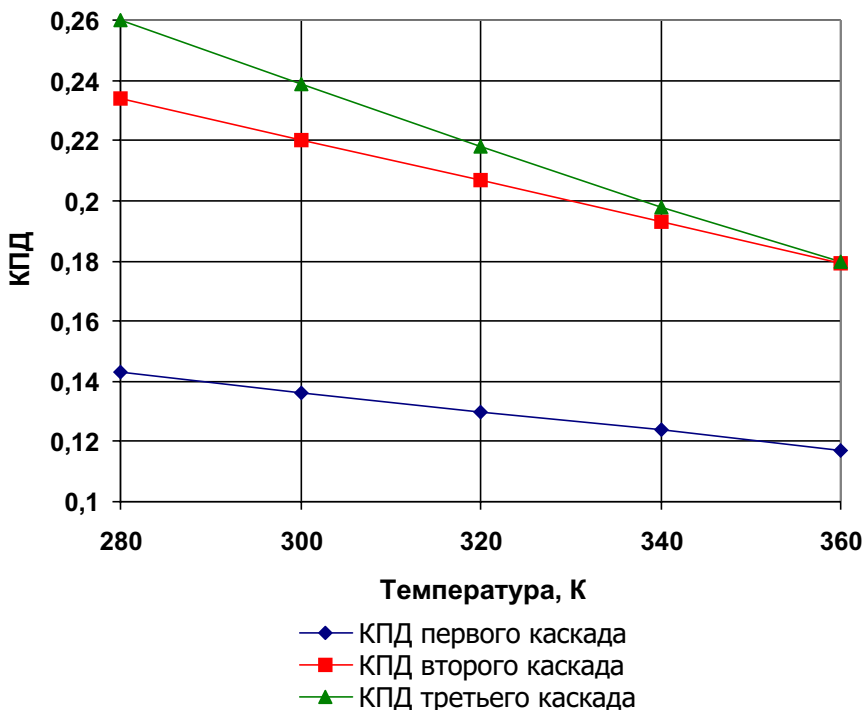


Рис. 4. Зависимость КПД ФЭП от температуры

ведение рабочего тока трехкаскадного ФЭП обусловлено ростом тока утечки. При одинаковых плотностях тока нагрузки любого каскада ФЭП плотности токов короткого замыкания отдельных каскадов при любой температуре зависят от ширины запрещенной зоны, возрастая по мере ее уменьшения от первого каскада до последнего. Объясняется это возрастанием тока утечки, наиболее существенным для малых значений ширины запрещенной зоны. Недостаточное значение эффективности получается из-за неоптимальности представленного в расчете ФЭП согласования по ширине запрещенной зоны и, следовательно, по распределению между каскадами энергии солнечного спектра. Вышеперечисленные особенности каскадных ФЭП позволяют сделать вывод о работоспособности предложенной модели.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ  
грант № 08-08-90254 Узб-а.*

#### Библиографический список

1. Грилихес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б. Солнечная энергия и космические полеты. — М.: Наука, 1984.
2. Popov G., Obukhov V., Akim E.L., Zaslavsky G., Klimov S, Konstantinov M, Fedotov G, Vasiliev Y, Pokryshkin A, Syotina V., Letin V. Ballistic Analysis for the Manned Mission to Mars with the Use of Solar Electric Propulsion System. 57th International Astronautical Congress. 2006.
3. Chiang P.K., Ermer J.H., Nishikawa W.T., Krut D.D., Joslin D.E., Eldredge J.W. Experimental Results of GaInP2/GaAs/Ge Triple Junction Cell Development for Space Power Systems 25 PVSC IEEE, May 13-17, 1996; Washington, Proceedings. Pp.183-186.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 23.10.2009