

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМЕ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПСЕВДОСПУТНИКА**

© 2018

- М. А. Ковалёв** доктор технических наук, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва  
[kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru)
- В. А. Зеленский** доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[vaz-3@yandex.ru](mailto:vaz-3@yandex.ru)
- А. А. Назаров** аспирант кафедры конструирования и технологий электронных систем и устройств;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[antonazarov63@gmail.com](mailto:antonazarov63@gmail.com)
- Д. Н. Овакимян** аспирант кафедры конструирования и технологий электронных систем и устройств;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[dd55@bk.ru](mailto:dd55@bk.ru)
- Р. М. Мирзоев** магистрант;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[mirzoew.rustam1994@yandex.ru](mailto:mirzoew.rustam1994@yandex.ru)

Беспилотные летательные аппараты имеют огромный потенциал и перспективы в расширении области применения: от фото- и видеосъёмки до обеспечения сотовой связи и ретрансляции сигналов. Самарским национальным исследовательским университетом имени С.П. Королёва разрабатывается атмосферный псевдоспутник, который должен функционировать исключительно за счёт солнечной энергии. Проведено исследование эффективности использования фотоэлектрических преобразователей в составе бортовой аппаратуры атмосферного псевдоспутника на базе беспилотного летательного аппарата «Фотон-601». Выполнен сравнительный анализ различных типов фотоэлектрических преобразователей из аморфного кремния. Разработана математическая модель и приведены расчёты площади покрытия солнечными элементами для выработки достаточной для функционирования мощности. Для соответствующей площади покрытия приведён расчёт массы солнечных элементов. Также в целях снижения массы беспилотного летательного аппарата и, как следствие, энергопотребления разработана методика математического расчёта минимальной и достаточной необходимой ёмкости аккумуляторной батареи, исходя из максимального количества солнечной энергии, которую возможно преобразовать в течение суток. Проанализированы результаты лётных испытаний и обозначены перспективы использования фотоэлектрических преобразователей в составе солнечных батарей атмосферных псевдоспутников

*Атмосферный псевдоспутник; беспилотный летательный аппарат; солнечные элементы; фотоэлектрические преобразователи; аморфный кремний; коэффициент фотоэлектрического преобразования.*

---

**Цитирование:** Ковалёв М.А., Зеленский В.А., Назаров А.А., Овакимян Д.Н., Мирзоев Р.М. Фотоэлектрические преобразователи в системе электроснабжения атмосферного псевдоспутника // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 55-60. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-55-60

## Введение

На базе Центра беспилотных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва реализуется проект атмосферного псевдоспутника (АПС) на основе беспилотного летательного аппарата (БПЛА) «Фотон-601» с солнечными панелями, установленными на левой и правой консолях крыла [1;2]. БПЛА «Фотон-601» - среднеплан нормальной аэродинамической схемы с двухкилевым оперением, поршневым двигателем «Valach 4-stroke» (мощность 10 л.с., объём 120 см<sup>3</sup>) и тянущим винтом постоянного шага. Фюзеляж типа «монокок» выполнен из композиционного материала – стеклопластика. Система посадки и спасения БПЛА состоит из вытяжного и основного парашютов, а также воздушного посадочного амортизатора. Тактико-технические характеристики БПЛА «Фотон-601» приведены в табл. 1.

Таблица 1. Тактико-технические характеристики БПЛА «Фотон-601»

Параметр	Значение
Скорость в горизонтальном полёте, км/ч	70-120
Максимальная вертикальная скорость, м/с	6
Максимальная допустимая высота полёта, м	3500
Дальность полёта, км	100
Взлётная масса, кг	до 60
Размах крыла, м	5,2
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	2,3

В основные задачи атмосферного псевдоспутника (АПС) входит:

- дистанционное зондирование Земли в видимом диапазоне спектра;
- мультиспектральная съёмка;
- метеонаблюдение;
- ретрансляция связи.

В результате анализа установлено, что для решения поставленных задач АПС должен удовлетворять тактико-техническим требованиям, приведённым в табл. 2.

Таблица 2. Тактико-технические требования к АПС

Параметр	Значение
Продолжительность полёта	Не менее 30 суток
Дальность радиопередачи	Не менее 150 км
Высота полёта (ночь/день)	15 / 20 км
Режим управления	Инерциальная навигационная система с коррекцией GPS/ГЛОНАСС Ручное пилотирование
Масса целевой аппаратуры	До 30 кг
Целевая аппаратура	Повторитель-усилитель радиосигнала Аэрофотоаппаратура Радиолокационная станция
Двигатель	Бесколлекторный электрический
Система энергоснабжения	Солнечная энергия Литий-серные аккумуляторы

Одной из проблем при разработке АПС является выбор бортового источника питания. В космической аппаратуре получили широкое распространение преобразователи солнечной энергии в электрическую. Полученный опыт открывает перспективы их ис-

пользования при разработке современных автономных БПЛА [3]. Благодаря солнечным батареям летательные аппараты смогут находиться в полёте достаточно продолжительное время, не используя при этом традиционное топливо. В светлое время суток в условиях избыточной солнечной радиации происходит заряд аккумуляторов, который впоследствии позволяет питать бортовые системы в условиях недостаточной освещённости. Использование солнечных батарей позволяет повысить автономность АПС, снизить массогабаритные показатели бортовых электронных средств.

### Кремниевые фотоэлектрические преобразователи

На сегодняшний день основными источниками энергии для космической бортовой аппаратуры являются фотоэлектрические преобразователи ФЭП [4]. Наибольшее применение получили кремниевые ФЭП.

Для экспериментальных полётов БПЛА была выбрана модель ФЭП ТСМ-15F, представляющая собой кремниевый солнечный фотоэлектрический модуль на гибкой пластиковой основе. Максимальная мощность ФЭП составляет 15 Вт  $\pm$ 5%, номинальное напряжение 12 В. Модуль лёгкий, тонкий, погодостойкий, обладает двухсторонней чувствительностью. В летний ясный день модуль способен выработать до 90 Вт·ч электроэнергии. Имеет малый размер и массу, устойчив к механическим повреждениям, прост в эксплуатации и хранении, имеет низкую стоимость. Недостатком является невысокий (около 8%) коэффициент фотоэлектрического преобразования (КФП), обусловленный, в том числе, фундаментальными свойствами материала.

В табл. 3 приведены технические характеристики ТСМ-15F. Все параметры приведены при стандартных условиях освещения: спектр АМ-1,5, 1000 Вт/м<sup>2</sup> (прямой солнечный свет, Солнце в зените), температура воздуха +25 °С.

Таблица 3. Технические параметры ФЭП ТСМ-15F

Параметр	Значение
Напряжение холостого хода, В	21 $\pm$ 5%
Напряжение при работе на нагрузку, В	17 $\pm$ 5%
Ток при работе на нагрузку, А	0,9 $\pm$ 5%
Мощность, Вт	15 $\pm$ 5%
Габариты, мм	600*265*1,5
Масса, кг	0,33
Температура эксплуатации и хранения, °С	-40...+50

В соответствии с расчётами, чтобы обеспечить бортовое оборудование БПЛА «Фотон-601» электроэнергией, вырабатываемая мощность с учётом потерь в цепях преобразователях напряжения должна составлять 100 Вт.

Исходя из конструкции и характеристик БПЛА, свойств ФЭП можно записать следующие выражения для расчёта площади покрытия ФЭП и массы солнечных панелей:

$$S = \frac{P_{\text{ном}} S_{\text{пан}}}{P_{\text{пан}}}, \quad (1)$$

$$m = \frac{S m_{\text{пан}}}{S_{\text{пан}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{потр}}$  – мощность, потребляемая БПЛА;  $S_{\text{пан}}$  – площадь одной солнечной панели;  $P_{\text{пан}}$  – мощность, вырабатываемая одной панелью;  $m_{\text{пан}}$  – масса одной солнечной панели.

Подставив в (1) и (2) значения из табл. 3, получим, что для выработки требуемых 100 Вт необходима площадь покрытия ФЭП  $S = 1,06 \text{ м}^2$  с массой  $m = 2,2 \text{ кг}$ .

В результате лётных испытаний БПЛА «Фотон-601», оснащённого ФЭП из аморфного кремния ТСМ-15F, установлено, что данными солнечными панелями возможно полностью обеспечить энергетические потребности аппарата.

### **Фотоэлектрические преобразователи на основе арсенида галлия**

В отличие от БПЛА, АПС будет работать на электрическом двигателе, который и будет потреблять основную долю мощности. Эквивалентная мощность двигателя «Valach 4-stroke» составляет 7400 Вт. Согласно (1), необходимая площадь покрытия солнечными батареями на основе кремниевых ФЭП ТСМ-15F равна  $S_{\text{ог}} = 78,44 \text{ м}^2$  и слишком велика для размещения на поверхность крыла БПЛА «Фотон-601». Поэтому необходимо использовать для ФЭП альтернативный материал, имеющий больший коэффициент фотоэлектрического преобразования (КФП).

Суммарная мощность потребления системами АПС составляет 21,5 кВт. Для энергоснабжения АПС наиболее эффективными являются ФЭП на основе арсенида галлия GaAs. Они имеют высокий теоретический КФП, так как ширина запрещённой зоны у них близка к оптимальному значению для полупроводниковых преобразователей солнечной энергии (1.4 эВ). КФП арсенид-галлиевых солнечных батарей доходит до 35-40 %, а максимальная рабочая температура – до +150 °С.

Вследствие более высокого уровня поглощения солнечного излучения, определяемого прямыми оптическими переходами в GaAs, и высокого КФП на их основе могут быть получены ФЭП со значительно меньшей, по сравнению с кремнием, толщиной. Принципиально достаточно иметь толщину фотопреобразователя 5-6 мкм для получения КФП порядка не менее 20 %, тогда как толщина кремниевых элементов не может быть менее 50-100 мкм без заметного снижения их КФП. Данный фактор позволяет создавать лёгкие плёночные GaAs ФЭП, для производства которых потребуется сравнительно мало исходного материала.

КФП преобразователя из GaAs больше КФП кремниевых ФЭП примерно в три раза. Следовательно для выработки одинаковой мощности необходима площадь в три раза меньше, и тогда  $S = 0,35 \text{ м}^2$ , соответственно для энергообеспечения электрического двигателя необходима площадь  $S_{\text{ог}} = 26,15 \text{ м}^2$ .

Расчёт площади покрытия батареями БПЛА даёт представление о габаритах АПС, а именно о необходимости большого размаха крыла (65-70 м) и относительно малой взлётной массы АПС – 350 кг.

### **Заключение**

Наилучшей альтернативой кремниевым ФЭП являются преобразователи из арсенида галлия. Такие ФЭП смогут полностью обеспечить потребности аппарата, что позволит использовать БПЛА «Фотон-601» в качестве атмосферного псевдоспутника.

### Библиографический список

1. Ковалёв М.А., Зеленский В.А., Овакимян Д.Н., Назаров А.А., Шатров М.А. Метод ориентирования беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия или неустойчивого приёма спутниковых сигналов // Сб. научных статей по материалам докладов IV Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. С. 177-180.
2. Ковалёв М.А., Зеленский В.А., Овакимян Д.Н., Назаров А.А., Мирзоев Р.М. Моделирование параметров ветровых возмущений при движении беспилотного летательного аппарата по заданному маршруту // Сб. научных статей по материалам докладов IV Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. С. 180-183.
3. Betancourth N.P., Villamarin J.P., Rios J.V., Bravo-Mosquera P.D., Cerón-Muñoz H.D. Design and Manufacture of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Civilian Surveillance Missions // Journal of Aerospace Technology and Management. 2016. V. 8, Iss. 4. P. 385-396. DOI: 10.5028/jatm.v8i4.678
4. Bhatt Manish R. Solar Power Unmanned Aerial Vehicle: High Altitude Long Endurance Applications. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. San Jose State University, 2012. 76 p.
5. Noth A. Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences. Zurich, 2008. 196 p.

### PHOTOELECTRIC CONVERTERS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF AN ATMOSPHERIC PSEUDO SATELLITE

© 2018

- M. A. Kovalyov** Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Aircraft Maintenance; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru)
- V. A. Zelensky** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Design and Technologies of Electronic Systems and Devices; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [vaz-3@yandex.ru](mailto:vaz-3@yandex.ru)
- A. A. Nazarov** Postgraduate Student; Department of Design and Technologies of Electronic Systems and Devices; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [antonnazarov63@gmail.com](mailto:antonnazarov63@gmail.com)
- D. N. Ovakimyan** Postgraduate Student; Department of Design and Technologies of Electronic Systems and Devices; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [dd55@bk.ru](mailto:dd55@bk.ru)
- R. M. Mirzoev** Graduate Student; Department of Radio Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [mirzoew.rustam1994@yandex.ru](mailto:mirzoew.rustam1994@yandex.ru)

Unmanned aerial vehicles have enormous potential and prospects in expanding the field of application from photo and video to providing cellular communications and relaying signals. An atmospheric pseudo satellite that is expected to function exclusively at the expense of solar energy is being developed at S.P. Korolyov Samara National Research University. A study of the efficiency of using photoelectric converters in the onboard equipment of an atmospheric pseudo satellite based on the unmanned aerial vehicle Foton-601 was carried out. A comparative analysis of various types of photovoltaic converters made of amorphous silicon was performed. A mathematical model was developed and the area of solar cells coating required to generate sufficient power was calculated. The

mass of the solar cells for the appropriate coating area was calculated. Also, in order to reduce the mass of an unmanned aerial vehicle and, as a result, its energy consumption, a method of mathematical calculation to determine minimum and sufficient required battery capacity was developed, on the basis of the maximum amount of solar energy that can be converted within 24 hours. The results of flight tests were analyzed and the prospects for the use of photoelectric converters as components of solar cells of atmospheric pseudo satellites were specified.

*Atmospheric pseudo satellite; unmanned aerial vehicle; solar cells; photoelectric converters; amorphous silicon; photoelectric conversion coefficient.*

---

*Citation:* Kovalyov M.A., Zelensky V.A., Nazarov A.A., Ovakimyan D.N., Mirzoev R.M. Photoelectric converters in the power supply system of an atmospheric pseudo satellite. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 55-60. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-55-60

## References

1. Kovalev M.A., Zelenskiy V.A., Ovakimyan D.N., Nazarov A.A., Shatrov M.A. Metod orientirovaniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh otsutstviya ili neustoychivogo priema sputnikovykh signalov. *Sb. nauchnykh statey po materialam dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «AVIATOR»*. Voronezh: VUNTs VVS «VVA» Publ., 2017. P. 177-180. (In Russ.)

2. Kovalev M.A., Zelenskiy V.A., Ovakimyan D.N., Nazarov A.A., Mirzoev R.M. Modelirovanie parametrov vetrovykh vozmushcheniy pri dvizhenii bespilotnogo letatel'nogo apparata po zadannomu marshrutu. *Sb. nauchnykh statey po materialam dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «AVIATOR»*. Voronezh: VUNTs VVS «VVA» Publ., 2017. P. 180-183. (In Russ.)

3. Betancourth N.P., Villamarin J.P., Rios J.V., Bravo-Mosquera P.D., Cerón-Muñoz H.D. Design and Manufacture of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Civilian Surveillance Missions. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016. V. 8, Iss. 4. P. 385-396. DOI: 10.5028/jatm.v8i4.678

4. Bhatt Manish R. Solar Power Unmanned Aerial Vehicle: High Altitude Long Endurance Applications. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. San Jose State University, 2012. 76 p.

5. Noth A. Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences. Zurich, 2008. 196 p.