

## ТРЕХМЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАТЫ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ «ФОТОН-АМУР 2.0», РАЗРАБОТАННОЙ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

© 2021

- Д. В. Фомин** кандидат физико-математических наук, доцент, директор научно-образовательного центра;  
Амурский государственный университет, г. Благовещенск;  
[e-office@yandex.ru](mailto:e-office@yandex.ru)
- М. А. Барулина** доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией,  
главный научный сотрудник;  
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов;  
[barulina@iptmuran.ru](mailto:barulina@iptmuran.ru)
- А. В. Голиков** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов;  
[golikov@iptmuran.ru](mailto:golikov@iptmuran.ru)
- Д. О. Струков** инженер научно-образовательного центра;  
Амурский государственный университет, г. Благовещенск;  
[tokloo@yandex.ru](mailto:tokloo@yandex.ru)
- А. С. Герман** магистрант факультета математики и информатики;  
Амурский государственный университет, г. Благовещенск;  
[dream\\_of\\_rains@mail.ru](mailto:dream_of_rains@mail.ru)
- А. А. Огородников** студент инженерно-физического факультета;  
Амурский государственный университет, г. Благовещенск;  
[aleksandrogorodnikov123@gmail.com](mailto:aleksandrogorodnikov123@gmail.com)

Исследованы тепловые поля электронной платы полезной нагрузки «Фотон-Амур 2.0», разработанной для наноспутников. Для численного моделирования был применён модифицированный метод тепловых балансов. Построенная модель и получаемые результаты численного моделирования были верифицированы путём сравнения с теплограммами, полученными для электронной платы «Фотон-Амур 2.0» в нормальных условиях. При моделировании условий эксплуатации в космическом пространстве предполагалось, что вне и внутри корпуса «Фотон-Амур 2.0» находится вакуум, тепловое воздействие передается от стоек наноспутника к электронной плате полезной нагрузки через крепления. Тепловое воздействие имеет периодический характер с амплитудой  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  с периодом 96 мин, что приблизительно соответствует движению наноспутника по орбите высотой 575 км. Было продемонстрировано, что при такой компоновке модуля полезной нагрузки его корпус может работать как пассивный терморегулятор тепловых полей на электронной плате. Результаты моделирования показали, что предложенная конструкция корпуса ПН является достаточно эффективной с тепловой точки зрения и позволяет поддерживать температуру от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , допустимую для используемых на управляющей плате ПН электронных компонентов.

*Наноспутник; моделирование тепловых полей; универсальная платформа полезной нагрузки; тепловые поля наноспутников; электронные платы; модифицированный метод тепловых балансов*

---

**Цитирование:** Фомин Д.В., Барулина М.А., Голиков А.В., Струков Д.О., Герман А.С., Огородников А.А. Трёхмерные неоднородные тепловые поля электронной платы полезной нагрузки «Фотон-Амур 2.0», разработанной для наноспутников // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 2. С. 74-82. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82

Полезная нагрузка (ПН) «Фотон-Амур 2.0» является модернизированной версией лётной ПН «Фотон-Амур 1.0», которая была установлена на спутник «Амур-Сат» («АмГУ-1»), выведенный на солнечно-синхронную орбиту 05 июля 2019 г. по программе «Универсат» [1;2]. ПН «Фотон-Амур 2.0» предназначена для исследования в условиях космического пространства электрических свойств экспериментальных фото-

электрических преобразователей (ФЭП): фотодиодов и фоторезисторов, изготовленных научным партнёром Амурского госуниверситета (АмГУ) – Институтом автоматизации и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН. Материал для новых электронных приборов был сформирован в научных лабораториях АмГУ и ИАПУ ДВО РАН на основе полупроводниковых силицидов на кремнии [3;4]. В ходе проведения эксперимента на борту спутника с помощью ПН осуществляются периодические замеры значений фототока ФЭП синхронно с определением температуры на поверхности спутника, освещенности и ионизирующего излучения. Данная информация сопровождается показаниями точного времени, определением местонахождения спутника, а также данными о фототоке солнечной батареи спутника, находящейся на одной грани с исследуемыми образцами. Полученные данные зависимостей фототока ФЭП от внешних факторов анализируются на Земле в течение всего срока функционирования спутника для определения скорости деградации экспериментальных фотоэлектрических преобразователей, а также определения факторов космического пространства, наиболее влияющих на деградацию ФЭП.

Учитывая важность задач, которые должна решать ПН, представляется необходимым и актуальным провести исследования нестационарных тепловых процессов, которые могут возникнуть при эксплуатации ПН в условиях космоса. Ранее аналогичное исследование было проведено для полезной нагрузки «Фотон-Амур 1.0» [5], в результате которого были сформулированы и внедрены предложения по использованию активных и пассивных методов термостабилизации, что в немалой степени обусловило успешную эксплуатацию «Фотон-Амур 1.0» в составе наноспутника «АмурСат» («АмГУ-1»).

### Постановка задачи

ПН «Фотон-Амур 2.0» состоит из двух модулей (рис. 1), включающих управляющее вычислительное устройство (большая по размеру плата) и панель экспериментальных фотоэлектрических преобразователей, дополнительно оснащённую датчиками.

Основным источником тепловыделения ПН является управляющее вычислительное устройство, плата которого выполнена в формате, близком к стандарту PC/104 для использования конструктивных возможностей платы [6] при её фиксации внутри корпуса космического аппарата. Панель фотоэлектрических преобразователей выводится на внешнюю сторону КА так, чтобы датчики и экспериментальные ФЭП были обращены в открытое космическое пространство.

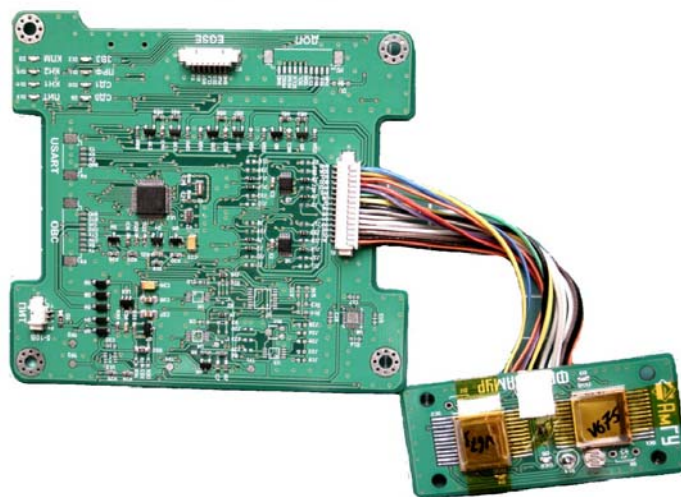


Рис. 1. Полезная нагрузка «Фотон-Амур 2.0»

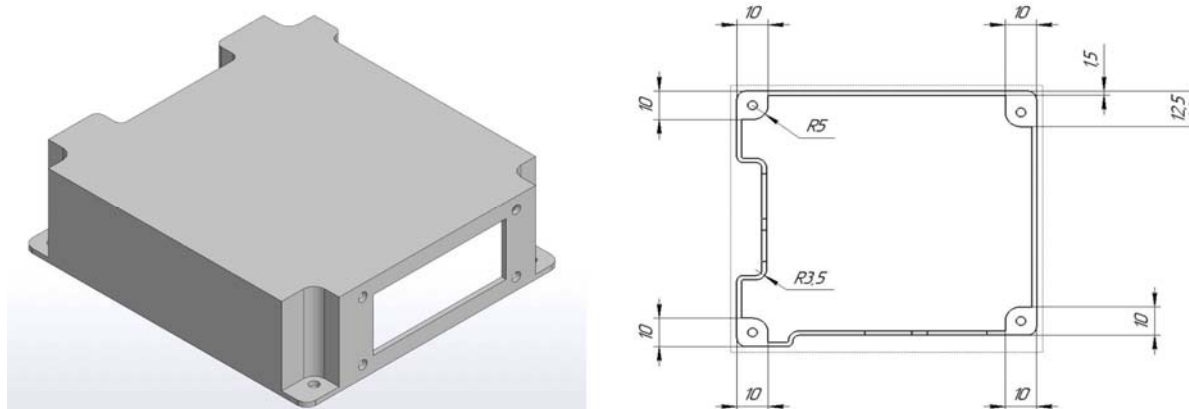


Рис. 2. 3D изображение корпуса ПН «Фотон-Амур 2.0» и размеры его нижней части

На рис. 2 показан алюминиевый корпус, разработанный для ПН «Фотон-Амур 2.0». Толщина стенок, основания и крышки составляет 1,5 мм, высота корпуса 28 мм.

Соприкосновение корпуса с платой управляющего вычислительного устройства осуществляется по контуру платы, полностью повторяя его за исключением разъёмных соединений. Плотность соединения достигается прикручиванием крышки винтами к стойкам платы посредством четырёх монтажных отверстий по углам конструкции. На рис. 2 показаны размеры нижней части корпуса.

### Математическая и тепловая модель

Математическая модель тепловых процессов, предназначенная для расчёта неоднородных, трёхмерных, нестационарных температурных полей, их производных и других температурных характеристик, построена на основе модифицированного метода элементарных тепловых балансов (МЭБ) [7].

Основной алгоритм расчёта температурного поля, учитывающий взаимовлияние тепловых потоков от элементарных объёмов, имеет следующий вид [8]:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{ci} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^N q_{ij} T_j + q_{ci} T_{ci} + Q_i \right), \quad (1)$$

где  $T_i$ ,  $T_i(t + \Delta t)$  – температура  $i$ -го элементарного объёма (ЭО) в настоящий и последующий моменты времени;  $c_i$  ( $i=1, \dots, M$ ) – теплоёмкость  $i$ -го ЭО;  $q_{ij}$  – теплопроводимость между  $i$ -м и  $j$ -м ЭО ( $j=1, \dots, N$ );  $q_{ci}$  – теплопроводимость между  $i$ -м ЭО и окружающей средой;  $T_{ci}$  – температура среды;  $Q_i$  – мощность источника тепла;  $M$  – общее количество ЭО в модели;  $N$  – количество ЭО, имеющих тепловой контакт с  $i$ -м ЭО;  $\Delta t$  – шаг расчёта.

На рис. 3 представлены управляющее вычислительное устройство ПН «Фотон-Амур 2.0» и его тепловая модель. На тепловой модели отмечены элементы, имеющие существенное тепловыделение ( $P_1, P_2, \dots, P_8$ ) и крепления  $C_1, C_2, C_3, C_4$ . Данные об этих элементах приведены в табл. 1.

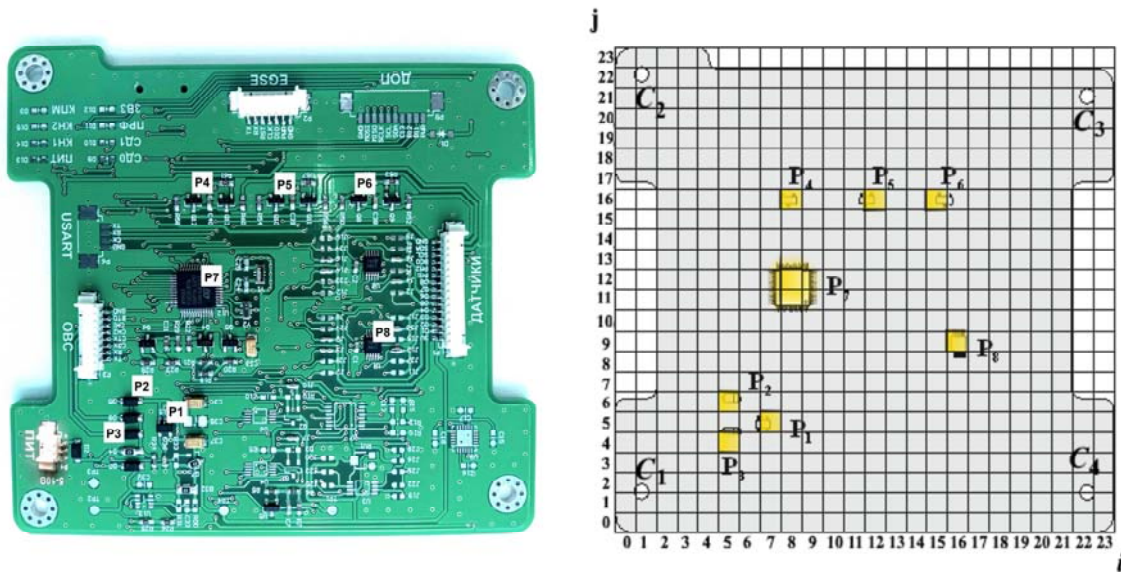


Рис. 3. Управляющее вычислительное устройство ПН «Фотон-Амур 2.0» и его тепловая модель ПН

Таблица 1. Данные элементов с наиболее сильным тепловыделением

Обозначение	Наименование	Описание	Допустимая (рабочая) температура, °С
P1	LD3985	Линейный стабилизатор напряжения	-40 до +125
P2	SS0520	Диод Шоттки	-65 до +125
P3			
P4	MMBT3906	Транзистор кремниевый биполярный PNP	-65 до +150
P5			
P6			
P7	STM32F103C8T6	Микроконтроллер	-40 до +105
P8	ADS1118	Аналого-цифровой преобразователь	-40 до +125

Для исследования трёхмерных неоднородных тепловых полей ПН «Фотон-Амур 2.0» на основе модели (1) было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) Foton-Amur 2.0 (рис. 4).

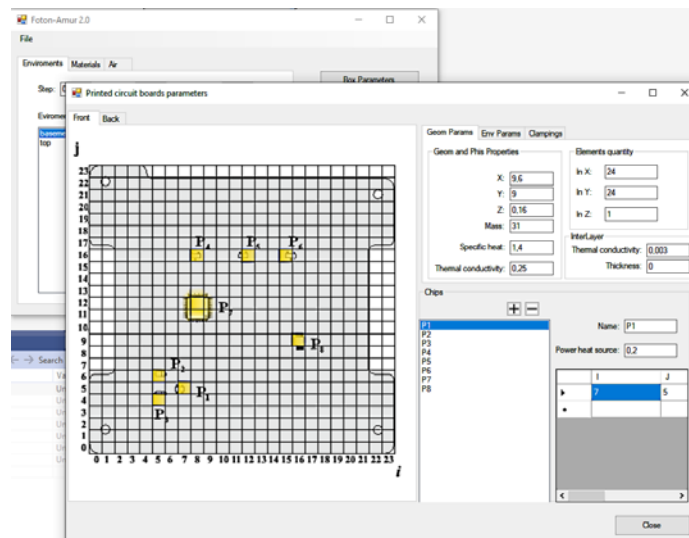


Рис. 4. Главное окно приложения Foton-Amur 2.0

Особенность разработанного ПО заключается в возможности динамической визуализации протекающих тепловых процессов в исследуемом объекте с течением времени в каждой расчётной точке, а также в возможности моделирования влияния тепловых процессов, изменяющихся по сложным законам, в том числе по случайным.

### Численное моделирование

На первом этапе сравнивались результаты расчёта рассматриваемой платформы полезной нагрузки в Foton-Amur 2.0 со значениями, получаемыми с помощью тепловизионного оборудования. Температура окружающей среды предполагалась постоянной и равной 30°C; управляющее вычислительное устройство ПН «Фотон-Амур 2.0» работало в режиме, рассчитанном на среднюю мощность. Результаты, полученные с помощью тепловизора Testo 875-1i, и результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 5, 6.

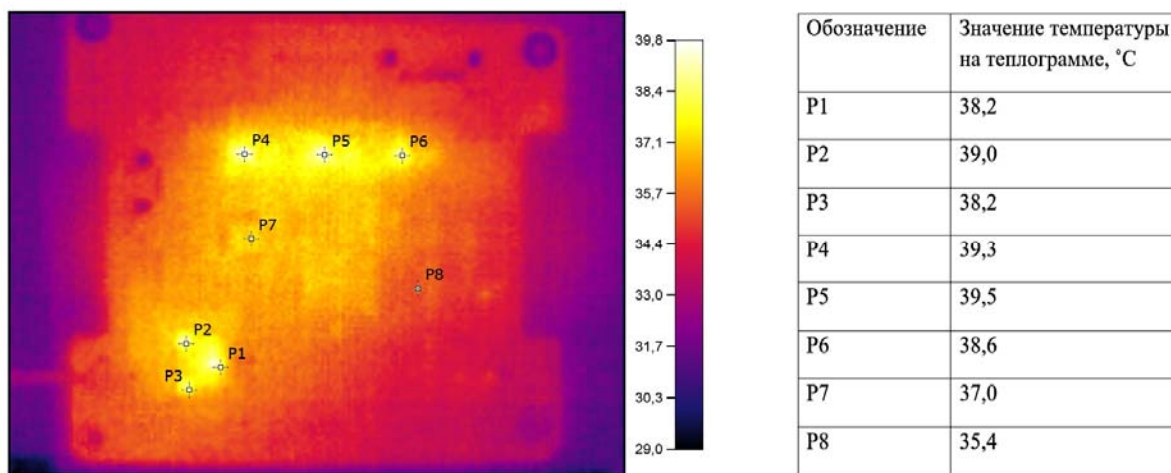


Рис. 5. Тепловое поле ПН, полученное тепловизором

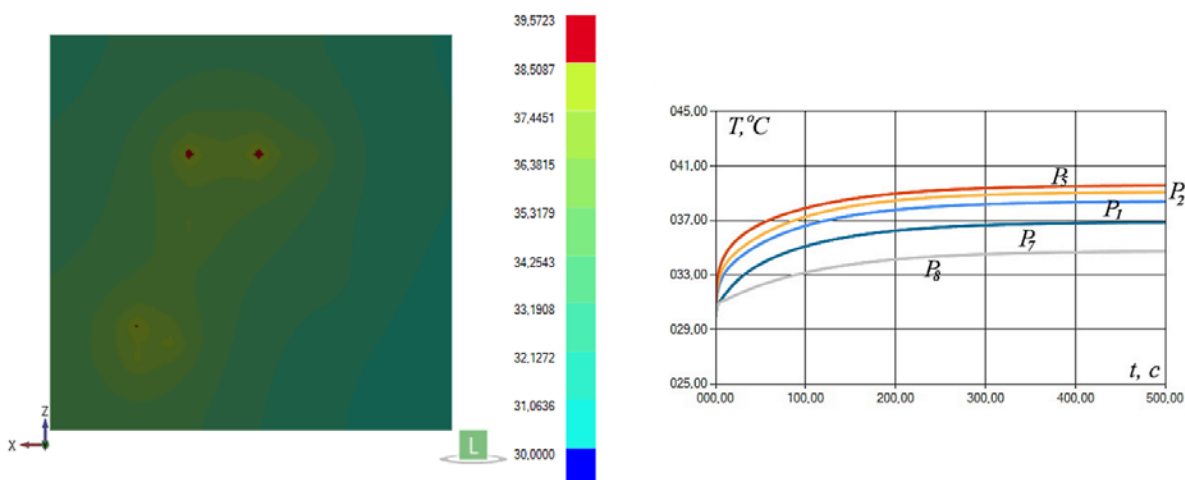


Рис. 6. Результат моделирования: тепловое поле ПН и графики изменения температуры в элементах  $P_1, P_2, P_3, P_7, P_8$



Как видно из рис. 5, 6, тепловое поле ПН, рассчитанное с помощью численного моделирования, в достаточной мере (с погрешностью менее 1%) соответствует данным тепловизора. Это доказывает корректность результатов, полученных в разработанном программном обеспечении Foton-Amur 2.0.

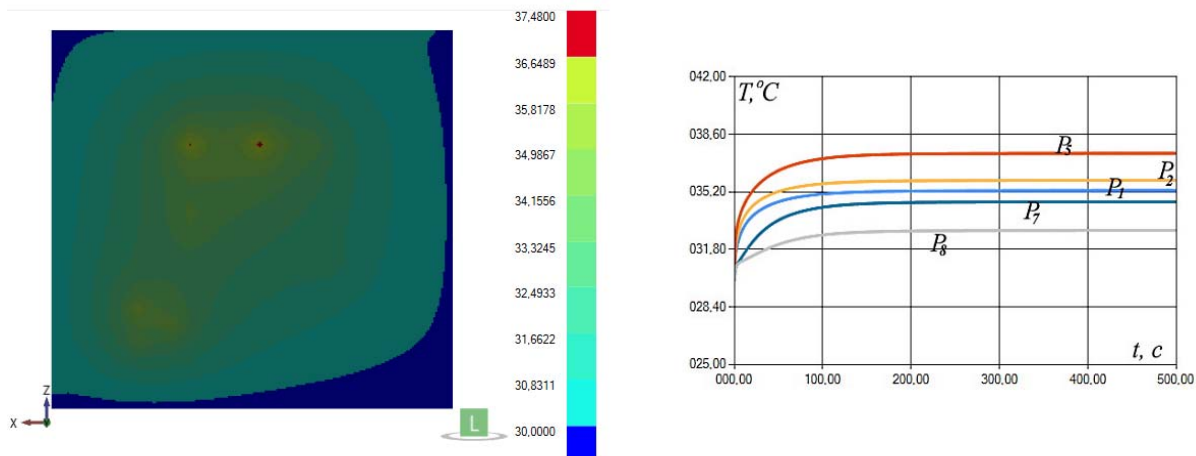


Рис. 7. Результат моделирования при установленном кожухе. Тепловое поле ПН и графики изменения температуры в элементах  $P_1, P_2, P_5, P_7, P_8$

На следующем этапе было исследовано влияние кожуха на тепловое поле ПН. Результат моделирования теплового поля платы ПН с установленным кожухом и креплениями показан на рис. 7. Предполагалось, что температура окружающей среды вокруг и внутри кожуха постоянная и равна  $30^\circ\text{C}$ . Окружающая среда – воздух, давление нормальное, дополнительный обдув отсутствует.

Как видно из рис. 6, 7, наличие корпуса позволяет снизить максимальную температуру на плате на  $2^\circ\text{C}$ , время стабилизации температурного поля также снизилось примерно с 300 с до 160 с. Это говорит о том, что корпус играет роль пассивного терморегулятора и позволяет отвести от платы излишнее тепло без необходимости использования дополнительных систем терморегулирования.

На заключительном этапе исследовалось влияние на ПН «Фотон-Амур 2.0» гармонических тепловых воздействий. При этом принимались следующие условия моделирования: предполагалось, что внутри наноспутника с установленным ПН «Фотон-Амур 2.0» – вакуум, корпус наноспутника в определённой степени изолирует ПН «Фотон-Амур 2.0» от солнечного излучения и обеспечивает дополнительный нагрев управляющей платы ПН «Фотон-Амур 2.0» и его корпуса до  $20^\circ\text{C}$ . Внешний корпус наноспутника нагревается от  $-45$  до  $+80^\circ\text{C}$  по периодическому закону с периодом 96 мин, что приблизительно соответствует движению наноспутника по орбите высотой 575 км. Также предполагалось, что через крепления ПН «Фотон-Амур 2.0» к наноспутнику периодическое тепловое воздействие переходит на управляющую плату.

На рис. 8 изображены графики изменения температуры в креплениях  $C_1$  и элементах  $P_1, P_5, P_8$ . Как видно из рис. 8, наличие кожуха позволяет поддерживать температуру на плате в пределах, допустимых для электронных компонентов. Так минимальная температура на электронных компонентах не менее  $-15^\circ\text{C}$  и не более  $+85^\circ\text{C}$  в условиях вакуума внутри и вне ПН при гармоническом тепловом воздействии через крепления ПН к стойкам в наноспутнике.

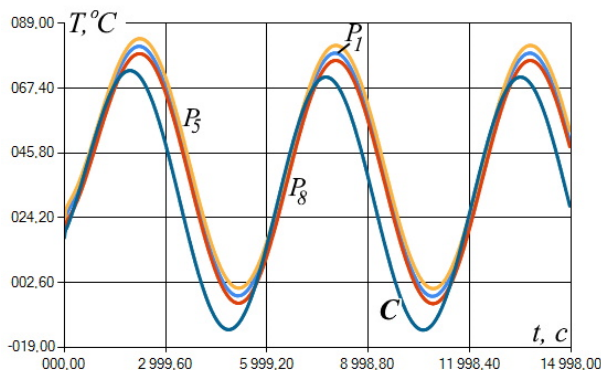


Рис. 8. Результат моделирования при установленном кожухе и гармоническом изменении температуры.  
Графики изменения температуры в элементах  $P_1, P_5, P_8$  и креплении  $C(C_1)$

### Анализ результатов

Результаты моделирования показали, что предложенная конструкция корпуса ПН является достаточно эффективной с тепловой точки зрения. В данном случае корпус играет роль пассивной системы терморегулирования и позволяет поддерживать температуру от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , допустимую для используемых на управляющей плате ПН электронных компонентов. При этом учитывались условия нахождения ПН в вакууме внутри и вне корпуса, и при наличии тепловых воздействий на управляющую плату от наноспутника – через крепления платы к стойкам внутри наноспутника. Очевидно, что эффективность отвода тепла от платы в такой конструкции существенно зависит от материала корпуса и соединительных элементов, наличия или отсутствия на нём дополнительных рёбер для сброса тепла в среду и площади теплового контакта с платой.

### Библиографический список

1. Зайко Ю.К., Верещагина Т.Г., Дементьев Ю.Н., Краснопеев С.В., Панасюк М.И., Папков А.П., Перетяtko О.Ю., Свертилов С.И. Результаты лётных испытаний нано-спутников класса Кубсат, запущенных в рамках реализации программы Московского университета «Универсат-Сократ» // Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского «Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность». Ч. 1. Калуга: Эйдос, 2020. С. 25-28.
2. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Бенгин В.В., Богомолов В.В., Гарипов Г.К., Добындэ М.И., Золотарев И.А., Калегаев В.В., Климов П.А., Оседло В.И., Перетяtko О.Ю., Петров В.Л., Подзолко М.В. Мониторинг радиационных полей в околоземном пространстве и атмосфере Земли в новых космических проектах Московского университета // Сборник тезисов докладов XI Международной конференции «Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений» (22-25 сентября 2020 г., с. Паратунка, Камчатский край). Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2020. С. 51-52.
3. Goroshko D.L., Galkin N.G., Fomin D.V., Goualnik A.S., Vavanova S.V. An investigation of the electrical and optical properties of thin iron layers grown on the epitaxial Si(111)-(2×2)-Fe phase and on an Si(111)7×7 surface // Journal of Physics Condensed Matter. 2009. V. 21, Iss. 43. DOI: 10.1088/0953-8984/21/43/435801
4. Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Goroshko D.L., Maslov A.M., Galkin N.G., Batalov R.I., Shustov V.A. Formation, structure and optical properties of nanocrystalline

BaSi<sub>2</sub> films on Si(111) substrate // Solid State Phenomena. 2016. V. 245. P. 42-48.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.245.42

5. Барулина М.А., Голиков А.В., Фомин Д.В., Струков Д.О. Моделирование трёхмерных неоднородных тепловых полей электронных плат наноспутников // Электронные информационные системы. 2018. № 2 (17). С. 22-30.

6. Пятницких А.В. Выбор решения в формате РС/104 // Автоматизация в промышленности. 2008. № 3. С. 40-43.

7. Pankratov V.M., Golikov A.V., Barulina M.A., Pankratova E.V., Efremov M.V. Problem statement for practical modeling of temperature fields of gyroscopes in space navigation systems // E3S Web of Conferences. 2020. V. 224.  
DOI: 10.1051/e3sconf/202022402006

8. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. 404 с.

### THREE-DIMENSIONAL INHOMOGENEOUS THERMAL FIELDS OF THE “PHOTON-AMUR 2.0” PAYLOAD ELECTRONIC BOARD DEVELOPED FOR NANOSATELLITES

© 2021

**D. V. Fomin** Candidate of Science (Phys. & Math.), Associate Professor,  
Director of the Research and Educational Center;  
Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation;  
[e-office@yandex.ru](mailto:e-office@yandex.ru)

**M. A. Barulina** Doctor of Science (Phys. & Math.), Head of Laboratory, Chief Researcher;  
Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy  
of Sciences, Saratov, Russian Federation;  
[barulina@iptmuran.ru](mailto:barulina@iptmuran.ru)

**A. V. Golikov** Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher;  
Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy  
of Sciences, Saratov, Russian Federation;  
[golikov@iptmuran.ru](mailto:golikov@iptmuran.ru)

**D. O. Strukov** Engineer of the Research and Educational Center;  
Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation;  
[tokloo@yandex.ru](mailto:tokloo@yandex.ru)

**A. S. German** Master's Student of the Faculty of Mathematics and Computer Science;  
Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation;  
[dream\\_of\\_rains@mail.ru](mailto:dream_of_rains@mail.ru)

**A. A. Ogorodnikov** Student of the Faculty of Engineering and Physics;  
Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation;  
[aleksandrogorodnikov123@gmail.com](mailto:aleksandrogorodnikov123@gmail.com)

The thermal fields of the “Photon-Amur 2.0” payload electronic board developed for nanosatellites were studied. The “Photon-Amur 2.0” payload consists of an electronic control board with a casing mounted in a nanosatellite and a remote panel with experimental photovoltaic converters. A modified heat balance method was used for numerical simulation of the thermal fields of the control board and the casing. The constructed model and the obtained results of the numerical simulation were verified by comparison with the thermal diagrams obtained for the “Photon-Amur 2.0” electronic board under normal operating conditions. For modeling the outer space operating conditions, it was assumed that there is a vacuum outside and inside the “Photon-Amur 2.0” casing, and the thermal effect is transmitted from the nanosatellite racks to the payload electronic board through the fastenings. The thermal effect is of a periodic nature with amplitude of  $-45$  to  $+80^{\circ}\text{C}$  and a period of 96 min, which approximately corresponds to the motion of a nanosatellite in a 575 km-high orbit. It was demonstrated



that with such composition of the payload module, its casing can work as a passive thermoregulator of thermal fields on the electronic board of "Photon-Amur 2.0". The simulation showed that the casing helps to keep the temperature on the control board in the interval of  $-15^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ , which is acceptable for the electronic components used on the payload control board.

*Nanosatellite; modeling of thermal fields; payload universal platform; thermal fields of nanosatellites; electronic boards; modified heat balance method*

---

*Citation:* Fomin D.V., Barulina M.A., Golikov A.V., Strukov D.O., German A.S., Ogorodnikov A.A. Three-dimensional inhomogeneous thermal fields of the "Photon-Amur 2.0" payload electronic board developed for nanosatellites. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 2. P. 74-82. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82

## References

1. Zayko Yu.K., Vereshchagina T.G., Dement'ev Yu.N., Krasnopeev S.V., Panasyuk M.I., Papkov A.P., Peretyat'ko O.Yu., Svertilov S.I. Results of flight tests of nanosatellites of Cubesat type launched in the frame of Moscow University program Universat-Socrat. *Materials 55's Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky «The Scientific Importance of K.E. Tsiolkovsky's Works: History and Modernity»*. Part 1. Kaluga: Eydos Publ., 2020. P. 25-28. (In Russ.)
2. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bengin V.V., Bogomolov V.V., Garipov G.K., Dobynde M.I., Zolotarev I.A., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Osedlo V.I., Peretjatko O.Yu., Petrov V.L., Podzolko M.V. Monitoring of radiation fields in near Earth space and atmosphere in new space projects of Moscow University. *Book of Abstracts XI International Conference «Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors» (September, 22-25, 2020, Paratunka, Kamchatka)*. Petropavlovsk-Kamchatkiy: IKIR FEB RAS Publ., 2020. P. 157-158. (In Russ.)
3. Goroshko D.L., Galkin N.G., Fomin D.V., Gournalnik A.S., Vavanova S.V. An investigation of the electrical and optical properties of thin iron layers grown on the epitaxial Si(111)-(2×2)-Fe phase and on an Si(111)7×7 surface. *Journal of Physics Condensed Matter*. 2009. V. 21, Iss. 43. DOI: 10.1088/0953-8984/21/43/435801
4. Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Goroshko D.L., Maslov A.M., Galkin N.G., Batalov R.I., Shustov V.A. Formation, structure and optical properties of nanocrystalline BaSi<sub>2</sub> films on Si(111) substrate. *Solid State Phenomena*. 2016. V. 245. P. 42-48. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.245.42
5. Barulina M.A., Golikov A.V., Fomin D.V., Strukov D.O. Modeling of three-dimensional inhomogeneous thermal fields of nanosatellite electronic boards. *Electronic Information Systems*. 2018. No. 2 (17). P. 22-30. (In Russ.)
6. Pyatnitskikh A.V. Decision making in the PS/104 format. *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*. 2008. No. 3. P. 40-43. (In Russ.)
7. Pankratov V.M., Golikov A.V., Barulina M.A., Pankratova E.V., Efremov M.V. Problem statement for practical modeling of temperature fields of gyroscopes in space navigation systems. *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 224. DOI: 10.1051/e3sconf/202022402006
8. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeystviy* [Sensors, devices and systems of aerospace and marine instrumentation in conditions of thermal effects]. St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor Publ., 2005. 404 p.