

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОСПУТНИКОВ

TEMPERATURE FIELDS
OF NANOSATELLITES ELEMENTS

M. Barulina
D. Fomin
A. Golikov
D. Strukov
A. German

Summary. The problem of constructing and studying a mathematical model of the inhomogeneous non-stationary temperature field of a nanosatellite is solved using the example of the payload module "Photon-Amur 1.1" under various types of operating conditions including the outer space conditions. Cases of placing an electronic board in an individual container with a vacuum and with air are considered. The effect of a stepped and harmonic temperature influences on the thermal fields of the electronic boards in the vacuumed casing has been revealed.

Keywords: modified heat balance method; modeling of thermal fields; electronic boards; universal payload platform; nanosatellite.

Барулина Марина Александровна

*Д.ф.-м.н., г.н.с., Институт проблем точной механики
и управления РАН (г. Саратов)*
marina@barulina.ru

Фомин Дмитрий Владимирович

*К.ф.-м.н., доцент, Амурский государственный
университет (Благовещенск)*
e-office@yandex.ru

Голиков Алексей Викторович

*К.т.н., в.н.с., Институт проблем точной механики
и управления РАН (г. Саратов)*
algolikov@yandex.ru

Струков Дмитрий Олегович

*Амурский государственный университет
(Благовещенск)*
tokloo@yandex.ru

Герман Анна Сергеевна

*Амурский государственный университет
(Благовещенск)*
dream_of_rains@mail.ru

Аннотация. Решена задача построения и исследования математической модели неоднородного нестационарного температурного поля наноспутника на примере модуля полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1 в различных условиях эксплуатации в космическом пространстве. Рассмотрены случаи помещения электронной платы в персональный контейнер с вакуумированием и без. Установлено влияние ступенчатого и гармонического изменений температуры на тепловые поля электронной платы в контейнере без герметизации.

Ключевые слова: модифицированный метод тепловых балансов; моделирование тепловых полей; электронные платы; универсальная платформа полезной нагрузки; наноспутник.

Введение

Условия эксплуатации наноспутников на орбите являются довольно жесткими [1–4]. Так, они функционируют в условиях вакуума, невесомости и перепадах температуры в широком диапазоне. При этом тепловые воздействия в подобных условиях могут оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики наноспутника, его компонентов, в том числе электронных. И, следовательно, повлиять на данные, получаемые с наноспутников. Поэтому задача исследования тепловых процессов, возникающих в наноспутниках и его элементах при его эксплуатации в реальных

условиях, является одной из важнейших задач при их проектировании.

При этом к настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных исследованию различных проблем, возникающих при проектировании и использовании наноспутников, таких как вопросов доставки на орбиту, развертывания, навигации и управления их движением [5–9]. Но работ, исследующих поставленную в данной статье проблему, явно недостаточно.

В настоящей работе решается задача построения и исследования математической модели неоднородно-

го нестационарного температурного поля наноспутника на примере модуля полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1 в различных условиях эксплуатации.

Математическая модель

Температурные поля, возникающие в наноспутниках и их компонентах, в общем случае являются трехмерными неоднородными нестационарными. Сложность конструкции и разнообразие различных факторов не позволяет решать возникающие при разработке наноспутников проблему аналитическим путем. Поэтому для исследования трехмерных нестационарных температурных полей в различных типах датчиков, приборах и системах на их основе был разработан модифицированный метод тепловых элементарных балансов (МЭБ), который к настоящему времени достаточно хорошо зарекомендовал себя при исследовании температурных полей в различных датчиках и устройствах [10,11].

Смысл МЭБ заключается в разбиении исследуемого объекта на «элементарные» тепловые объемы, представляющие собой элементы конструкции. В «элементарном» объеме могут находиться как источники, так и стоки тепла. «Элементарные» объемы могут контактировать между собой и с окружающей внешней и внутренней средой, также имеющую температуру. Отличием МЭБ от других методов конечно-элементного моделирования является то, что, во-первых, он сводится к разностной схеме и не требует составления дифференциальных уравнений, а, во-вторых, рассчитывается средняя температура элементарного объема. При этом приближенное решение, полученное с помощью основного разностного алгоритма МЭБ, сходится к точному решению соответствующей дифференциальной краевой задачи с погрешностью $O(\Delta t + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$.

Математическая модель, выражающая МЭБ, имеет вид [11]:

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

где $T_i(t)$, $T_i(t+\Delta t)$ — температуры i -го «элементарного» объема (ЭО) в настоящий и последующий момент времени соответственно; c_i ($i=1, \dots, M$) — теплоемкость ЭО; q_{ij} — теплопроводности между i -м и j -м ЭО; q_{ic} — теплопроводность между i -м ЭО и окружающей средой; $T_{ci}(t)$ — температура среды; $Q_i(t)$ — мощность

источника тепла; M — общее количество ЭО в модели; N — количество ЭО, имеющих тепловой контакт с i -м ЭО; Δt — шаг расчета.

Под коэффициентом теплопроводности q понимается величина суммарной тепловой проводимости, учитывающая теплообмен теплопроводностью, конвекцией и излучением:

$$q = q_T + q_K + q_H, \quad (2)$$

где q_T, q_K, q_H — коэффициенты теплопроводности, учитывающие теплообмен соответственно теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Для расчета коэффициентов теплопроводности, входящих в выражение (2), в данной работе были использованы следующие формулы.

1. Коэффициент, учитывающий теплообмен теплопроводностью:

$$q_T = \frac{S}{l \lambda}, \quad (3)$$

где S — площадь поверхности нормальная к тепловому потоку; l — толщина элемента; λ — коэффициент теплопроводности материала элемента.

2. Коэффициент, учитывающий теплообмен конвекцией:

$$q_K = \alpha_K S, \quad (4)$$

где α_K — коэффициент теплоотдачи; S — площадь поверхности теплоотдачи.

3. Коэффициент, учитывающий теплообмен излучением:

$$q_H = \alpha_H S, \quad (5)$$

где α_H — коэффициент; S — площадь поверхности теплоотдачи излучением.

В соотношениях (4), (5) коэффициенты α_K, α_H вычисляются в зависимости от законов теплообмена, определяющих режимы движения окружающей среды около элементарного объема.

Так, для вакуумированных и слабо газонаполненных датчиков, приборов и блоков приборов коэффициенты α_H определяются по формуле:

$$\alpha_H = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_H [(T_1 + 273)^2 + (T_2 + 273)^2] + (T_1 + T_2 + 546)^2, \quad (6)$$

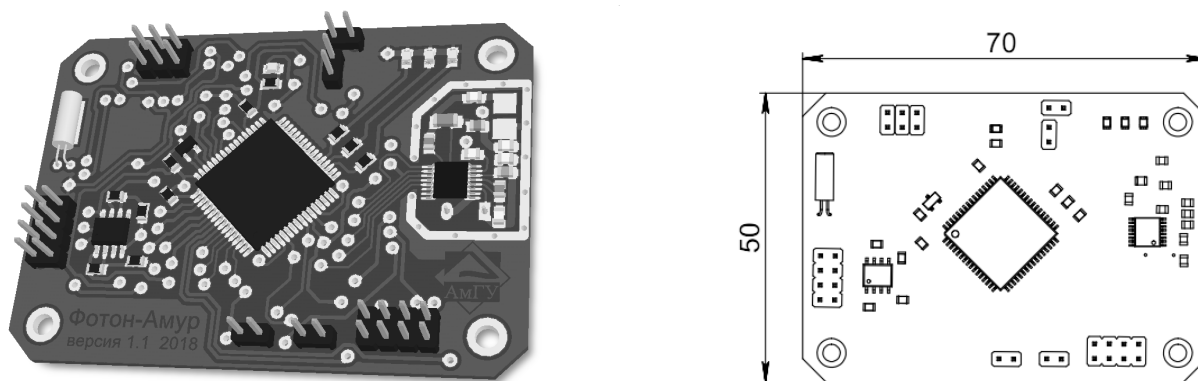


Рис. 1. Модуль полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1

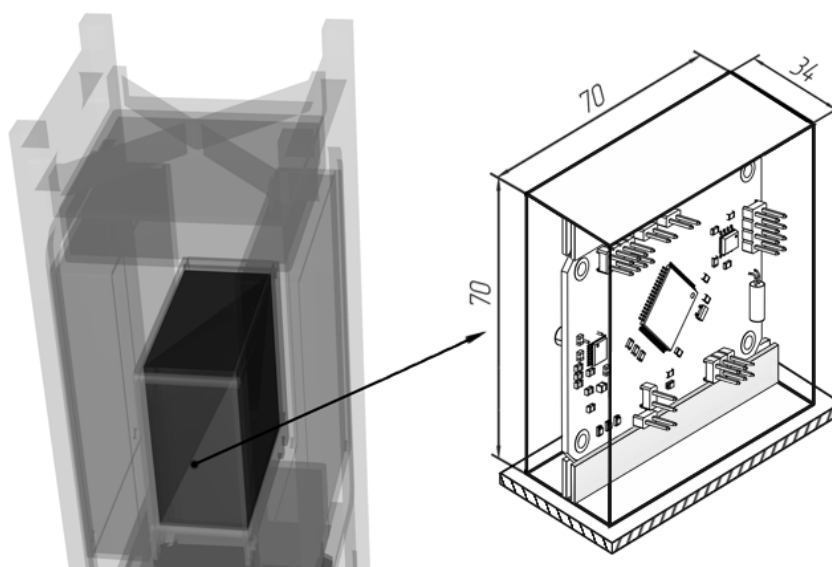


Рис. 2. МПН-ФА 1.1 в составе корпуса CubeSat 3U и вариант крепления платы в кожухе

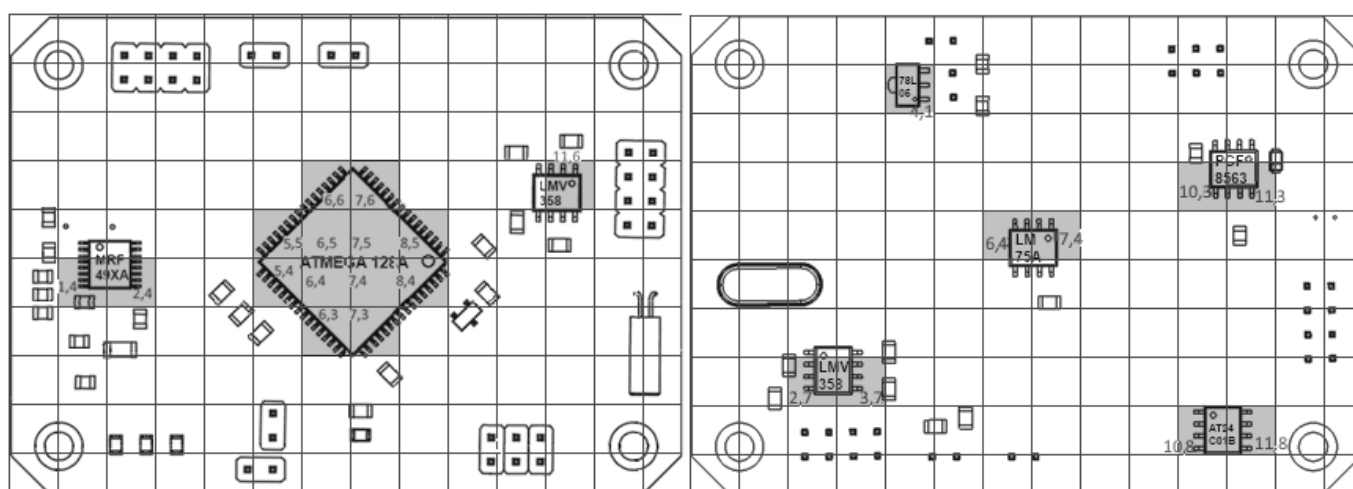


Рис. 3. Тепловая модель двусторонней электронной платы МПН-ФА 1.1

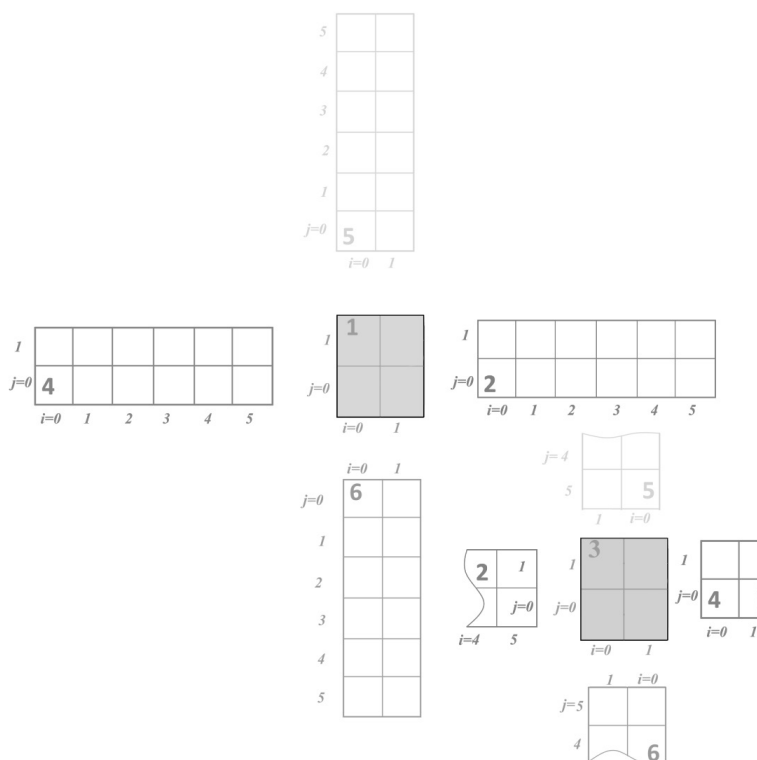


Рис. 4. Тепловая модель кожуа МПН-ФА 1.1

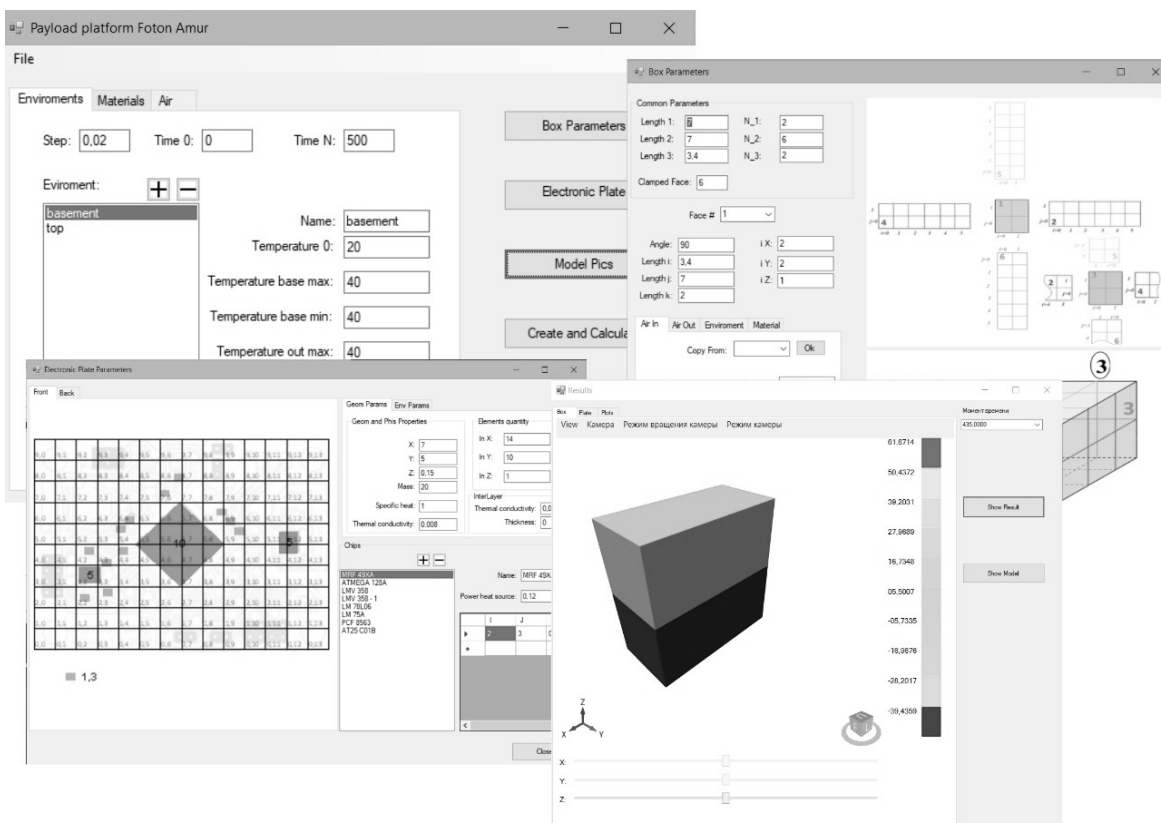


Рис. 5. Программное обеспечение для моделирования температурных полей МПН-ФА 1.1

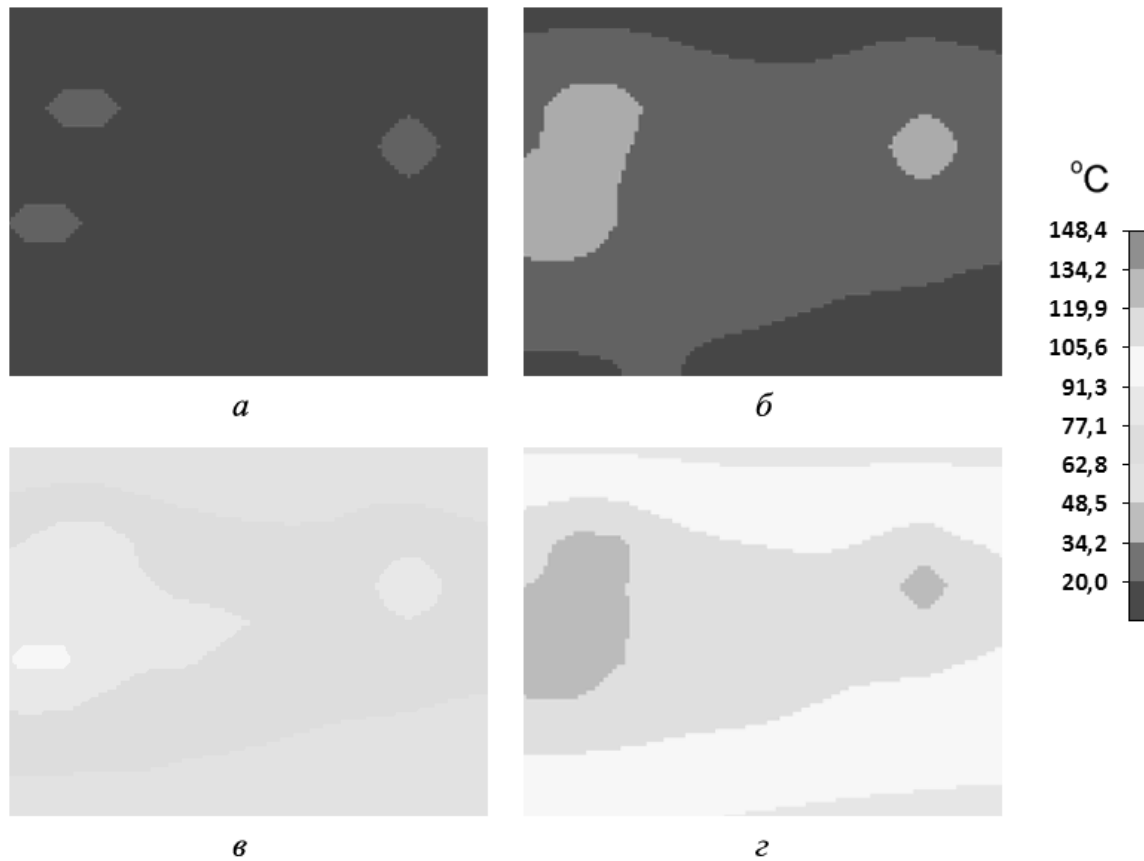


Рис. 6. Температурные поля на плате в моменты времени:
а — 1,5 мин; б — 15 мин; в — 150 мин; г — 300 мин

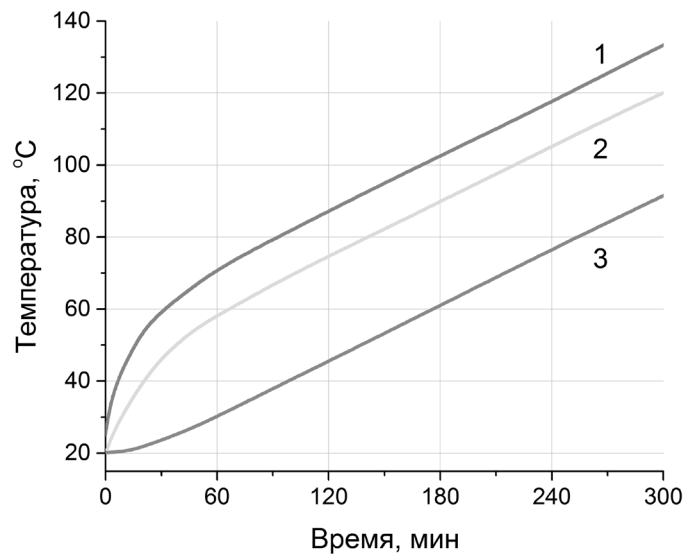


Рис. 7. Графики изменения температуры на компонентах платы при вакуумировании платы и кожуха:
1 — LMV358; 2 — ATMEGA128A; 3 — нижняя грань кожуха

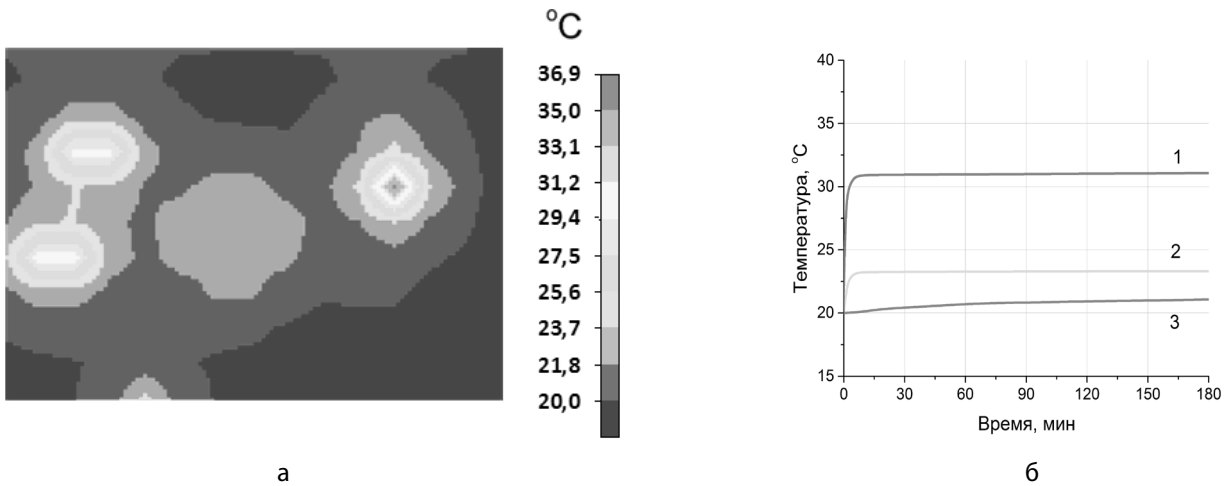


Рис. 8. Температурное поле на плате после установления теплового равновесия(а) и графики изменения температуры на компонентах платы при наличии воздуха внутри кожуха (б):
1 — LMV358; 2 — ATMEGA128A; 3 — нижняя грань кожуха

$$\text{где } \varepsilon_{II} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2)}$$

приведенная степень черноты поверхностей тел, между которыми происходит теплообмен; $0 < \varepsilon_1, \varepsilon_2 < 1$ — степени черноты поверхностей тел; T_1, T_2 — температуры поверхностей тел в °C.

Тепловая модель модуля полезной нагрузки

Для расчета температурных полей с помощью математической модели (1)-(6) необходимо создать тепловую модель изучаемого прибора или устройства. Тепловая модель состоит из элементарных тепловых объемов и связей между ними и окружающей средой.

В данной работе исследование температурных полей элементов наноспутников было проведено на примере модуля полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1 (МПН-ФА 1.1) (рис. 1), разработанного в Амурском государственном университете для использования в наноспутнике Московского авиационного института.

Функциональная схема, размеры, компоновка и элементный состав МПН-ФА (рис. 1) были существенно переработаны по сравнению с первой версией прототипа [12]. Согласно требованиям Московского авиационного института, размер МПН-ФА был изменен для размещения в блочной системе. Возможный вариант крепления печатной платы МПН-ФА 1.1 и размещение кожуха в корпусе показаны на рис. 2.

Подобный вариант размещения в экранированном корпусе, с одной стороны позволяет снизить, а в некото-

рых случаях исключить полностью, воздействие на другие узлы спутника непреднамеренных электромагнитных помех, как создаваемых модулем, так и обратное влияние на модуль со стороны аппаратуры наноспутника. С другой стороны, подобное размещение требует исследования температурных полей данного устройства.

Тепловая модель МПН-ФА 1.1 показана на рис. 3, тепловая модель кожуха представлена на рис. 4.

Программное обеспечение и компьютерные эксперименты

Для расчета температурных полей МПН-ФА 1.1 было создано оригинальное программное обеспечение (рис. 5).

На первом этапе изучались температурные поля платы МПН-ФА 1.1 без учета дополнительного нагрева кожуха. Рассматривалось два варианта. В первом варианте предполагалось, что снаружи и внутри кожуха находится вакуум. Во втором варианте считалось, что внутри кожуха находится воздух. Температура в начальный момент времени принималась равной 20°C. Теплофизические параметры материала кожуха соответствуют алюминиевому сплаву V93.

На рис. 6 приведены результаты моделирования — температурные поля на электронной плате в разные моменты времени.

На рис. 7 представлены временные зависимости изменения температуры на компонентах платы и нижней грани кожуха. Графики изменения температуры по-

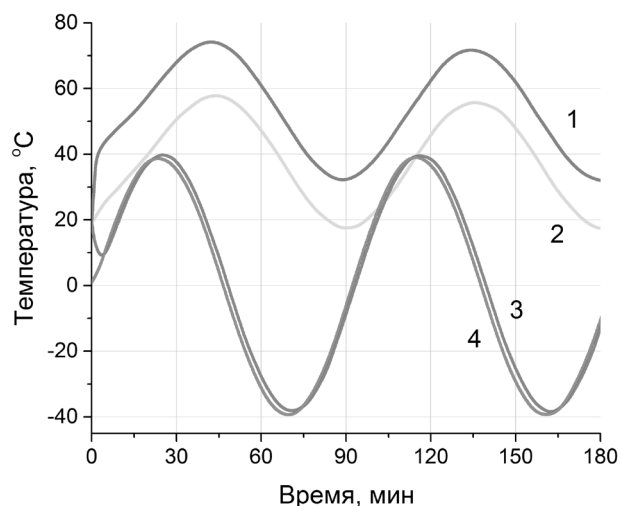


Рис. 9. Изменение температуры на компонентах платы и кожуха при гармоническом тепловом воздействии на нижнюю грань кожуха:

1 — LMV358; 2 — ATMEGA128A; 3 — верхняя грань кожуха; 4 — нижняя грань кожуха

строены для элементов с наибольшим тепловыделением — ATMEGA128A (ЭО (7,6) на рис. 3) и LMV358 (ЭО (11,6) на рис. 3).

На рис. 8 приведены результаты моделирования для случая герметизации кожуха, внутри которого находится воздух при давлении равном 1 атм.

На следующем этапе было изучено влияние гармонического изменения температуры на температурные поля МПН-ФА 1.1. При моделировании предполагалось, что нижняя грань кожуха закреплена, и ее температура изменяется по гармоническому закону с амплитудой 40 °C и с периодом 91.3831 мин, что примерно соответствует движению наноспутника по орбите высотой 350 км. Также предполагалось, что пространство вокруг и внутри кожуха можно считать вакуумом. Графики изменения температуры на элементах платы, верхней и нижней грани кожуха показаны на рис. 9.

Как видно из рис. 7 и 8, при ступенчатом изменении температуры желательно избегать вакуумирования электронной платы даже при отсутствии дополнительного теплового воздействия на кожух модуля.

С другой стороны, при наличии гармонического теплового воздействия на грани кожуха, одна или несколь-

ко его граней могут служить для электронной платы тепловым шунтом для сброса лишнего тепла даже в условиях вакуумирования (рис. 9). Следовательно, подбором материалов и других характеристик кожуха можно добиться, чтобы температура на электронных компонентах платы модуля полезной нагрузки не достигала некомфортных для электроники значений при нахождении наноспутника на орбите.

Заключение

В работе были исследованы тепловые поля блока с электронной платой в условиях эксплуатации в космическом пространстве на примере модуля универсальной платформы полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1. Установлено влияние ступенчатого и гармонического изменений температуры на тепловые поля электронной платы. Продемонстрирована возможность применения модифицированного метода тепловых балансов к расчёту нестационарных неоднородных тепловых полей электронных плат наноспутников. Выработаны предложения по использованию пассивных и активных методов стабилизации тепловых полей универсальной платформы полезной нагрузки Фотон-Амур 1.1.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 19-08-00839

ЛИТЕРАТУРА

1. Акишин А. И., Новиков Л. С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. — М.: Знание, 1983. 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия», № 4).
2. Егоров А. М. Анализ возможных отказов типового наноспутника // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 471–476.

3. Резник С. В., Просунцов П. В., Денисов О. В., Петров Н. М., Ли В. Расчетно-экспериментальная методика определения тепло-проводности композиционного материала корпуса наноспутника // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 345–352.
4. Романов А. А., Селиванов А. С., Тюлин А. Е. Перспективы разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения АО «Российские космические системы» // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 415–422.
5. Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А., Лопатин В. П. Применение навигационной аппаратуры ГНСС на борту наноспутника // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 5. С. 437–445.
6. Белоконов И. В., Крамлих А. В., Мельник М. Е. Оценка пространственной ориентации и угловой скорости наноспутника по анализу геометрической видимости навигационных космических аппаратов с использованием управляемой диаграммы направленности навигационной антенны // В сборнике: XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Главный редактор В. Г. Пешехонов. 2017. С. 416–419.
7. Белоконов И. В., Богатырев А. М., Крамлих А. В. Разработка и исследование алгоритмов определения относительной навигации и ориентации на основе дальномерных измерений // В сборнике: Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам Сборник материалов. Главный редактор В. Г. Пешехонов. 2018. С. 329–336.
8. Нестерин И. М., Пичхадзе К. П., Сысоев В. К., Финченко В. С., Фирсюк С. О., Юдин А. Д. Предложение по созданию устройства для схода наноспутников cubesat с низких околоземных орбит // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 3 (37). С. 20–26.
9. Пайсон Д. Малые спутники в современной космической деятельности // Технологии и средства связи. 2016. № 6 (117). С. 64–69.
10. Барулина М. А., Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов, термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности датчика температур при тепловом ударе // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2008. № 4. С. 52–58.
11. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / под общей ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2005. — 404 с.
12. Барулина М. А., Голиков А. В., Фомин Д. В., Струков Д. О. Моделирование трехмерных неоднородных тепловых полей электронных плат наноспутников // Электронные информационные системы. 2018. № 2(17). С. 22–30. DOI: 10.17586/0021–3454–2018–61–5–185–189

© Барулина Марина Александровна (marina@barulina.ru), Фомин Дмитрий Владимирович (e-office@yandex.ru),

Голиков Алексей Викторович (algolikov@yandex.ru),

Струков Дмитрий Олегович (tokloo@yandex.ru), Герман Анна Сергеевна (dream_of_rains@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Г. Саратов