

МАЛЫЕ СПУТНИКИ С НОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ВНЕШНЕГО ПОКРЫТИЯ

С.С. Чибухчян, Д.К. Бадалян

Национальный политехнический университет Армении

Разработка, производство и запуск даже малых спутников - важный и символический шаг с точки зрения стимулирования развития аэрокосмической инженерии в том или ином регионе и активного сотрудничества в сфере высоких технологий. Космическая отрасль представляет особый интерес для Армении с учетом ее геополитического важного значения в регионе, научно-технического потенциала, системы образования в сфере подготовки профессиональных инженерных кадров. Развитие аэрокосмического сектора представляет для Армении стратегический приоритет, обладающий значимым мультипликативным эффектом. Будучи по своей сути междисциплинарной сферой, космическая деятельность выступает катализатором для кооперации научных, проектных и образовательных институтов, способствуя синергетическому развитию смежных областей науки, технологий и подготовки кадров.

Развитие малых спутников, как междисциплинарной отрасли, имеет особое значение для технических университетов с целью внедрения и реализации совместных новых образовательных программ. С этой целью в НПУА выполняются работы по исследованию и применению новых материалов для малых спутников. В последние годы во многих странах тесно занимаются разработкой, производством и технической эксплуатацией микроспутников, которые в основном используются в образовательных и исследовательских программах для зондирования отдельных участков регионов планеты.

Разработана математическая модель и проведен численный анализ нестационарного температурного состояния спутника Cubesat 2U на типичной солнечно-синхронной орбите.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости срочных проектных корректировок, таких как редизайн радиационных поверхностей, внедрение активных или пассивных систем отвода тепла от батарейного блока и оптимизация внутренней компоновки для минимизации теплового воздействия на критические компоненты.

Ключевые слова: космическая деятельность, Армения, малые космические спутники, базальтовые нити, граничные условия, нестационарный теплообмен.

Введение. Космическую отрасль по праву можно назвать "экономикой будущего". В современном мире развитая космическая отрасль выступает неотъемлемым элементом научно-технологического прогресса, являясь катализатором инноваций и признаком высокого уровня развития национальной экономики и исследовательской инфраструктуры [1].

Обладая высокой степенью технологической и организационной сложности, космическая деятельность в силу своего кооперативного характера оказывает растущее влияние на мировые процессы. Космическое пространство выступает в роли незаменимой среды для апробации инновационных технологий и междисциплинарных научных концепций, результаты которых имеют прикладное значение для решения актуальных задач, варьирующихся от региональных до глобальных.

Технологические основы для создания национальных космических аппаратов были заложены еще в 1969 году, когда под руководством Григора Гурзяна был успешно реализован проект от проектирования до орбитального запуска спутника. В 1971 году на борту первой советской космической станции «Салют-1» в космос была выведена обсерватория «Орион-1», а в 1973 году на борту космического корабля «Союз-13» в космическое пространство была выведена орбитальная звездная обсерватория «Орион-2».

1 декабря 2023 года был успешно выведен на околоземную орбиту первый космический спутник армянского производства Hayasat-1, созданный отечественной лабораторией Vazoomq и Центром развития образования и научных инноваций (CSIE). Запуск состоялся на ракете Falcon-9 компании SpaceX с базы Ванденберг (штат Калифорния, США). Вес спутника — 1 кг, параметры - 10 см × 10 см × 10 см. Отправляемые спутником сигналы можно перехватывать, когда он проходит по небу над Арменией [2]. До 2028 года планируется запустить в космос еще два армянских спутника.

Важно констатировать, что огромный потенциал российской космической отрасли востребован и в Армении — стране, которая внесла неоценимый вклад в развитие этого потенциала [3].

Армения ведет переговоры о задействовании на территории страны спутниковой системы Starlink. Starlink — глобальная система искусственных спутников компании SpaceX, с помощью которой можно получить доступ к высокоскоростному широкополосному спутниковому интернету практически в любой точке планеты. В начале октября 2024 г. основатель компании Илон Маск заявил, что надеется вскоре запустить этот сервис в Армении [4].

Основу каждого наукоемкого предприятия ракетно-космической отрасли должны составлять кадры, обладающие опытом и производственными навыками, которые позволяют успешно производить разработки, внедрять новые технологические процессы, проводить испытания и совершенствовать уже созданные технологии [5].

Помимо этого, нужны специалисты, которые будут определять перспективные направления создания технологий, минимизируя возможные потери (материальные и репутационные) [6,7].

В последние годы во многих странах тесно занимаются разработкой, производством и технической эксплуатацией микроспутников класса CubeSat (кубсат – формат малых и сверхмалых искусственных спутников Земли, имеющих габариты 10х10х10 см при массе не более 1,33 кг, запуск которых стоит всего несколько десятков тысяч долларов США). Эти спутники в основном используются в образовательных и исследовательских программах для зондирования отдельных участков регионов с целью дальнейшей обработки и анализа. Их данные пока, как правило, не используются для серьезных целей, реализуемых посредством реальных спутниковых программ. Такие спутники создают хорошую основу развития знаний и навыков будущих специалистов авиакосмической отрасли [8,9].

Малые космические аппараты формата Cubesat, в частности U2 (100х100х227 мм), обладают крайне ограниченными массогабаритными характеристиками, что накладывает жесткие требования к системе теплового контроля. Отсутствие активных систем терморегулирования делает их температурные режимы критически зависимыми от внешних тепловых потоков и внутреннего тепловыделения электронных компонентов [10,11].

Постановка задачи и методы исследования. Разработка и производство современных наукоемких изделий требуют создания необходимых для этого экономических условий, подготовки соответствующих кадров и значительного роста расходов на НИОКР, проведения исследований с применением новейших технологий, методики и инструментариев. Для повышения технико-эксплуатационных показателей малых спутников и их конкурентоспособности предлагается применение в качестве внешней оболочки ткани из базальтовых нитей, исследование внешнего состояния и расчет сопряженного теплообмена спутника.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и проведение численного анализа нестационарного температурного состояния спутника Cubesat 2U на типичной солнечно-синхронной орбите. Тепловой режим бортовой электроники (микросхем) и источников питания

(батарей) формируется под воздействием внешних (солнечная радиация) и внутренних (джоулев нагрев) источников тепла. При этом эффективный теплоотвод в условиях верхних слоев атмосферы ограничен из-за низкой плотности воздуха, что приводит к резкому снижению коэффициента конвективной теплоотдачи.

Для прогнозирования температурного поля космического аппарата и идентификации участков с экстремальными тепловыми нагрузками выполняется трехмерное численное моделирование газодинамических потоков. Модель учитывает геометрические особенности конструкции, внешнее солнечное излучение и несопряженный теплообмен (табл. 1,2).

Границы и геометрия расчетной области представлены на рис. 1, стенка №1 – внешняя стенка кожуха аппарата, стенки №2 и №3 – внутренние стенки верхнего отсека источника питания и нижнего отсека.

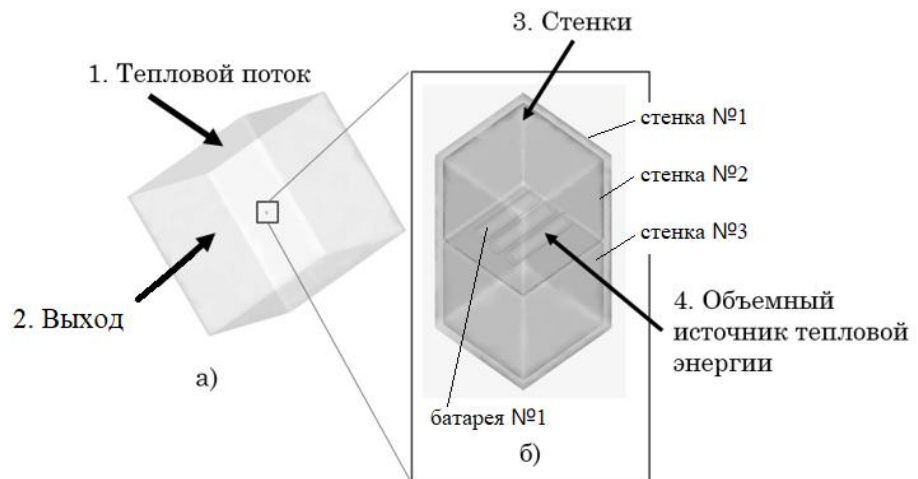


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи и граничные условия:
А - домен атмосферы, б - домен спутника

Таблица 1

Значения параметров на границах

N	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Тепловой поток	$Вт/м^2$	1361
2	Избыточное давление на выходе	$Па$	0
3	Условия сопряженного теплообмена на стенках		
4	Тепловая мощность источника питания	$кВт/м^3$	60

Таблица 2

Уравнения расчетной модели

№	Уравнения
1	Неразрывности
2	Навье-Стокса
3	Сохранения энергии
4	Закон Фурье
5	Модель дискретных ординат

Результаты исследования. Результаты численного моделирования теплового режима, представленные на рис. 2-4, демонстрируют динамику нагрева ключевых элементов конструкции и выявляют критические термические нагрузки. Анализ температурной эволюции внешнего корпуса (рис.2) в течение характерного орбитального интервала (~ 12000 с) показывает неоднородное распределение теплового поля: установившиеся температуры для различных участков (стенок №1, №2, №3) варьируются от 33°C до 62°C , что свидетельствует о существенном влиянии геометрии аппарата, внешних тепловых потоков и локализации внутренних источников энергии. Наиболее значимый результат касается теплового состояния системы электроснабжения. Данные, приведенные на рис.3, указывают на то, что температура литий-ионной батареи №1 в установившемся режиме достигает $87...88^\circ\text{C}$. Такое значение не только превышает допустимый для долговременной эксплуатации предел в $40...45^\circ\text{C}$, гарантирующий сохранение ресурса, но и приближается к порогу срабатывания систем аварийной защиты. Сводная оценка, иллюстрируемая рис.4, позволяет констатировать критические условия для

всего батарейного отсека: в частности, смоделированная температура батареи №2 достигает зоны начала необратимого экзотермического процесса — теплового разгона, в то время как батареи №1 и №3 также функционируют в опасном высокотемпературном диапазоне.

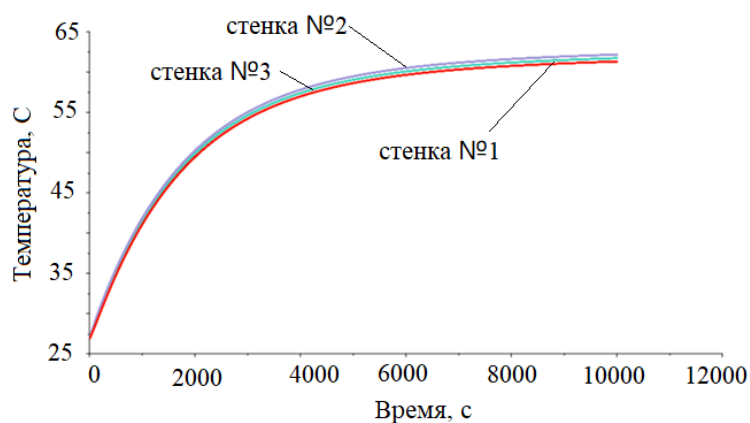


Рис.2. Скорость изменения температур стенок

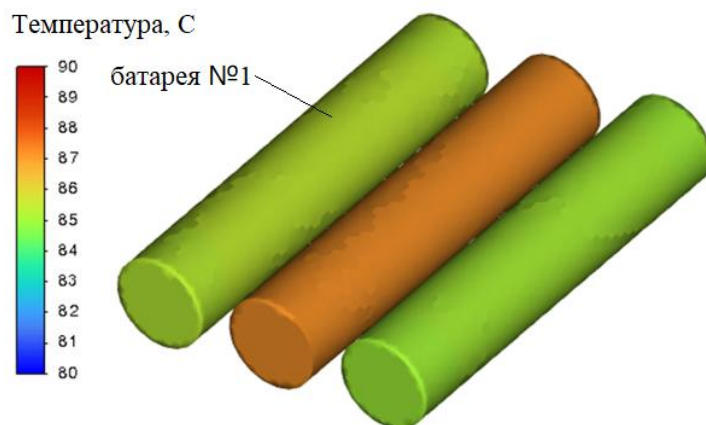


Рис.3. Поле температур на стенках источника питания

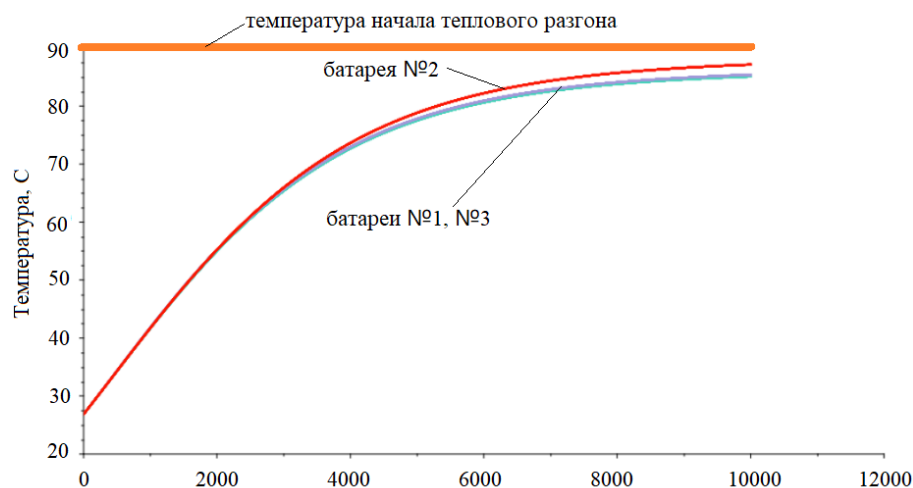


Рис.4. Скорость изменения температур батарей

Заключение. В работе представлены описание геометрии и граничных условий спутника, результаты расчета, физико-математическая модель, описывающая нестационарный теплообмен в спутнике.

Основные выводы:

- требуется дополнительная верификация расчетной модели по результатам экспериментов и литературным данным;
- за 3 часа теплообмен переходит в стационарный режим;
- средняя по площади температура блока питания составляет 87 °C;
- средняя температура стенок составляет 62 °C;
- тепловой поток - 2900 Вт/м².

Полученные данные однозначно свидетельствуют о недостаточной эффективности текущей схемы терморегулирования в условиях разреженной атмосферы, где конвективный теплоотвод минимален. Это обуславливает необходимость срочных проектных корректировок, таких как редизайн радиационных поверхностей, внедрение активных или пассивных систем отвода тепла от батарейного блока и оптимизация внутренней компоновки для минимизации теплового воздействия на критические компоненты.

Литература

1. **Чибухчян С.С., Белых И.Е., Бодров В.К.** Подготовка кадров для аэрокосмической отрасли Армении. Этапы создания аэрокосмической лаборатории: от проектирования до управления космическими аппаратами //

- Вестник НПУА: Механика, машиноведение, машиностроение. - 2024.- №2.- С. 58-65. DOI: 10.53297/18293387-2024.2-58/
2. <https://armenpress.am/ru/article/1205982>
 3. <https://armeniatoday.news/science-and-technology-ru/271488/>
 4. **Тополкараев А.В., Краев В.М.** Повышение качества трудового потенциала высокотехнологичных предприятий авиационной промышленности // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2024. – № 10-2. – С. 275-281; URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=3808> (дата обращения: 20.01.2025).
 5. **Хачатурян А.А., Пономарева С.В., Власов А.В.** Проблемы подготовки кадров и внедрения инноваций в ракетно-космическую промышленность России // Экономические науки. - 2020. - С.170-172. DOI 10.24411/2073-3305-2020-10169.
 6. **Kohhanovshaya I.I., Zalyhhova A.L., Khachaturyan A.A., Khachaturyan K.S.** Questions of the estimation of efficiency of public administration in modern conditions // SNS Web of Conferences. -2019.- V. 62. - G. 02002.
 7. **Bouwmeester J., Falke W., Langer M.** Cubesat Mission Analysis and Thermal Modelling Development [Электронный ресурс] // Proceedings of the International Astronautical Congress. – 2016. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/311754767_Cubesat_Mission_Analysis_and_Thermal_Modelling_Development (дата обращения: 20.10.2023).
 8. **Karam A., Hegazy A. A., Alaa M.A.** Transient Thermal Model of a CubeSat with Passive Thermal Management // International Journal of Aerospace Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1-15. – DOI: 10.1155/2021/6672113.
 9. **Toorian A., Munakata R., Diaz R.A.** Thermal Analysis and Design Tool for CubeSats (Cubesat Thermal Analysis Tool - CTAT) [Электронный ресурс] // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. – 2018. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8392570> (дата обращения: 20.10.2023).
 10. **Weigel S.K.A., Liedtke P.P.** Development of a Modular Thermal Analysis Tool for CubeSats and Its Application to the UWE-3 Satellite // CEAS Space Journal. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 215–227. – DOI: 10.1007/s12567-020-00298-5.
 11. Thermal Analysis of a 3U CubeSat using COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // COMSOL Knowledge Base. – 2022. – Режим доступа: <https://www.comsol.com/model/thermal-analysis-of-a-3u-cubesat-12345> (дата обращения: 20.10.2023).

*Поступила в редакцию 03.01.2026.
Отправлена на рецензию 13.01.2026.
Принята к опубликованию 17.04.2026.*

ԱՐՏԱՔԻՆ ԾԱԾԿՈՒՅԹԻ՝ ՆՈՐ ՆՅՈՒԹԵՐՈՎ ՓՈՔՐ ԱՐԲԱՆՅԱԿՆԵՐ

Ս.Ս. Չիբուխյան, Դ.Կ. Բադալյան

Նույնիսկ փոքր արբանյակների մշակումն ու գործարկումը կարևոր և խորհրդանշանական քայլ է այս կամ այն տարածաշրջանում աերոտիեզերական ճարտարագիտության զարգացման մոտիվացման և բարձր տեխնոլոգիաների ոլորտում ակտիվ համագործակցության համար: Տիեզերական ոլորտի զարգացումը հատուկ հետաքրքրություն է ներկայացնում Հայաստանի համար, հաշվի առնելով նրա աշխարհաքաղաքական կարևոր նշանակությունը տարածաշրջանում, գիտատեխնիկական հնարավորությունները, բարձրակարգ ճարտարագիտական կարողների պատրաստման ոլորտում կրթության համակարգը: Աերոտիեզերական սեկտորի զարգացումը Հայաստանի համար ունի ոչ միայն ռազմավարական առաջնահերթություն, այլև զգալի մոլոտիպիկատիվ արդյունք: Ըստ էության լինելով միջոլորտային՝ տիեզերական գործունեությունը դառնում է կատալիզատոր գիտական, նախագծային և ուսումնական կառույցների կոոպերացման համար, նպաստելով գիտության խաչվող ճյուղերի, տեխնոլոգիաների և կարգերի պատրաստման սիներգետիկական զարգացմանը:

Փոքր արբանյակների՝ որպես միջոլորտային ճյուղի զարգացումը առանձնապես կարևոր նշանակություն ունի տեխնիկական համալսարանների համար՝ նպատակ ունենալով ներդնել և իրականացնել համատեղ նոր կրթական ծրագրեր: Այս նպատակով ՀԱՊՀ -ում իրականացվում են փոքր արբանյակների համար նոր նյութերի կիրառման հետազոտություններ: Վերջին տարիներին մի շարք երկրներում սերտորեն զբաղվում են միկրոարբանյակների մշակմամբ, արտադրությամբ և տեխնիկական շահագործմամբ, որոնք հիմնականում կիրառվում են կրթական և հետազոտական ծրագրերում՝ երկրագնդի առանձին տեղամասերը զոնդավորելիս:

Մշակվել է արեգակնային-սինքրոն տիպային ուղեծրում Cubesat 2U արբանյակի ջերմաստիճանային վիճակի ֆիզիկամաթեմատիկական մոդելը, և կատարվել է ոչ ստացիոնար ջերմաստիճանային վիճակի թվային վերլուծությունը:

Ստացված արդյունքները հաստատում են նախագծային շտապ շտկումներ կատարելու անհրաժեշտությունը, ինչպիսիք են ռադիացիոն մակերևույթի վերադիզայնը, մարտկոցային բլոկից ջերմության հեռացման ակտիվ և պասիվ համակարգերի ներդրումը և ներքին հարմարադասման օպտիմալացումը՝ կրիտիկական բաղկացուցիչների վրա ջերմային ազդեցության նվազեցման համար:

Առանցքային բառեր. տիեզերական գործունեություն, Հայաստան, փոքր տիեզերական արբանյակներ, բազալտե թելեր, սահմանային պայմաններ, ոչ ստացիոնար ջերմափոխանցում:

SMALL SATELLITES WITH NEW EXTERNAL COATING MATERIALS

S.S. Chibukhchyan, D.K. Badalyan

The development, production, and launch of even small satellites is an important and symbolic step in terms of stimulating the development of aerospace engineering in a given region and active cooperation in the field of high technology. The space industry is of particular interest to Armenia, given its geopolitical importance in the region, its scientific and technical potential, and its education system for training professional engineers. The development of the aerospace sector is a strategic priority for Armenia, with a significant multiplier effect. Being inherently interdisciplinary, space activities act as a catalyst for cooperation between scientific, design, and educational institutions, contributing to the synergistic development of related fields of science, technology, and training.

The development of small satellites as an interdisciplinary field is of particular importance for technical universities with a view to introducing and implementing joint new educational programs. To this end, NPUA is conducting research and applying new materials for small satellites. In recent years, many countries have been closely involved in the development, production, and technical operation of microsatellites, which are mainly used in educational and research programs to probe specific areas of the planet.

A mathematical model was developed and a numerical analysis of the unsteady temperature state of the Cubesat 2U satellite in a typical sun-synchronous orbit was performed.

The results obtained indicate the need for urgent design adjustments, such as redesigning radiation surfaces, introducing active or passive heat removal systems from the battery block, and optimizing the internal layout to minimize the thermal impact on critical components.

Keywords: space activities, Armenia, small space satellites, basalt fibers, boundary conditions, unsteady heat transfer.