

## ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВМЕСТНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИВМ СО РАН И ОАО «ИСС» ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА»

В. В. Шайдуров<sup>1</sup>, В. А. Деревянко<sup>1</sup>, Е. Н. Васильев<sup>1</sup>,  
В. Е. Косенко<sup>2</sup>, В. Д. Звонарь<sup>2</sup>, В. Е. Чеботарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50. E-mail: dv@icm.krasn.ru

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*Представлены основные результаты и перспективы экспериментальных и теоретических исследований нестационарных тепловых режимов космических аппаратов системы ГЛОНАСС. Описан иерархический подход к математическому моделированию теплового режима космического аппарата. Рассмотрены математические модели прецизионного терморегулирования атомных стандартов частоты и теплонагруженных приборов. Дано описание конструкции локальной системы прецизионной термостабилизации с применением термоэлектрических преобразователей и гипертеплопроводящих пластин (плоских тепловых труб). Проведенные расчеты и эксперименты показали, что локальная система термостабилизации позволяет поддерживать температуру блоков атомного стандарта частоты в диапазоне 10–20 °С с точностью не превышающей 0,1 °С.*

*Ключевые слова: космический аппарат, тепловой режим, математическое моделирование*

## RESULTS AND PROSPECTS OF JOINT HEAT PHYSICAL RESEARCHES OF ICM OF THE SB RAS AND JSC “ACADEMICIAN M.F. RESHETNEV “INFORMATION SATELLITE SYSTEMS”

V. V. Shaidurov<sup>1</sup>, V. A. Derevyanko<sup>1</sup>, E. N. Vasilyev<sup>1</sup>,  
V. E. Kosenko<sup>2</sup>, V. D. Zvonar<sup>2</sup>, V. E. Chebotarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling of the SB RAS

50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: dv@icm.krasn.ru

<sup>2</sup>JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”  
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

*Basic results and perspective problems of the experimental and theoretical researches of the unsteady heat regimes of the GLONASS system spacecrafts are presented. A hierarchical approach to the mathematical modeling of the heat regime of the spacecraft is described. Mathematical models of precision thermal control of atomic frequency standards and spacecraft heat-loaded devices are considered. A description of the construction of the local precision temperature stabilization system using thermoelectric converters and hyper-heat conducting plates (flat heat pipes) is given. Calculations and experiments have shown that the local system allows to maintain the temperature of heat setting atomic frequency standards blocks in the range of 10–20 °C with accuracy of no more than 0,1 °C.*

*Keywords: spacecraft, heat regime, mathematical modeling.*

В настоящее время приоритетной задачей при разработке и создании космических аппаратов (КА) становится обеспечение долговечности и надежной работоспособности всех основных узлов и блоков. Одним из главных условий, гарантирующих выполнение данной задачи, является поддержание оптимального теплового режима работы каждого элемента бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Движущийся по орбите КА постоянно находится в сложных тепловых условиях. Температурный режим КА является существенно нестационарным: периодически происходит включение и выключение блоков РЭА, при движении по орбите на поверхность КА падает переменное тепловое облучение от Земли и вращающихся

солнечных батарей, на некоторых участках орбиты спутник может оказываться в тени Земли. В таких условиях обеспечение оптимального теплового режима работы каждого элемента КА является сложной задачей. В рамках решения проблемы коллектив Института вычислительного моделирования СО РАН более 20 лет активно сотрудничает с разработчиками космической техники ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева. К основным направлениям совместной работы относятся расчетно-теоретические и экспериментальные исследования тепловых режимов бортовой РЭА.

Теоретические исследования направлены на создание математических моделей тепловых режимов,

а также разработку программных средств теплового проектирования для нового поколения КА негерметичного исполнения. Такие спутники должны стать более легкими, надежными и долговечными. Однако задача отвода теплоты на таких аппаратах стоит более остро из-за отсутствия воздушной среды на борту. Для расчета тепловых режимов негерметичных КА была разработана иерархическая трехуровневая модель.

С помощью модели первого уровня производится расчет теплового режима всего космического аппарата с минимальной детализацией. Математическая модель основана на численном решении нестационарных уравнений радиационно-кондуктивного теплообмена. На основе этой модели создан пакет прикладных программ (ППП) для расчета теплового режима КА, движущегося по произвольной орбите, с учетом эффективной теплоемкости конструкции и приборов, теплового сопротивления посадочных мест и переменной теплопроводности радиационных панелей. При этом задаются параметры орбиты, внешние нестационарные тепловые потоки от Солнца, Земли и навесных элементов спутника, для каждого блока РЭА учитываются теплофизические характеристики и параметры тепловых контактов. Вычислительное моделирование позволяет в динамике наблюдать температурное поле всего космического аппарата при движении его по орбите, и выявлять элементы аппаратуры с недопустимым тепловым режимом. В случае необходимости конструкция, расположение и другие характеристики элементов спутника могут быть легко изменены, а расчет повторен для новых условий. В результате расчетов определяется оптимальная конструкция спутника и компоновка бортовой аппаратуры, при которой каждый прибор работает в требуемом температурном диапазоне.

На следующем более детальном уровне производится оптимизация теплового режима работы каждого прибора РЭА на основе вычисленных граничных условий теплообмена. Для расчетов задается конфигурация прибора, состоящего из нескольких блоков – плат с радиоэлементами. Учитывается суммарная мощность тепловыделения элементов в блоках, внешние тепловые потоки, теплофизические свойства материалов. По результатам расчетов определяются блоки с недопустимыми тепловыми режимами, проводится их перекомпоновка или перераспределение тепловых потоков.

На третьем самом детальном уровне проводится расчет теплового режима каждого радиоэлектронного блока. Учитываются характеристики и расположение всех радиоэлектронных элементов, включая их размеры и мощности. В результате такого детального расчета появляется возможность добиться того, чтобы каждый радиоэлемент КА работал в своем оптимальном температурном режиме, поскольку именно надежность радиоэлектронного элемента определяет ресурс КА в целом.

Эти работы проводились в рамках Федеральной космической программы и завершились созданием

«Интегрированной многоуровневой системы Градиент-2» проектирования КА блочно-модульного исполнения, в которую работы ИВМ СО РАН вошли составной частью.

Для расчета температурных режимов теплонагруженных сотовых панелей (СП) КА негерметичного исполнения создан ППП «Panel Emulator» на базе современных средств программирования и эффективных вычислительных алгоритмов, позволяющих проводить расчет тепловых режимов различных конфигураций и комплектаций СП. Расчетная часть и интерфейс ППП разделены и реализованы в разных программных компонентах, связанных между собой с помощью XML-схемы. При моделировании тепловых режимов учитываются циклограммы включения приборов и нагревателей, динамика изменения внешних радиационных потоков при движении КА по орбите, геометрия приборной сотовой панели с учетом отверстий и выступов. В процессе проведения вычислений отображается в цвете динамика изменения температурных полей, спектр цветов равномерно распределяется от минимального до максимального значений температуры. ППП «Panel Emulator» позволяет конструктору оперативно изменять варианты компоновки СП, оценивать их пригодность в соответствии с требованиями к тепловому режиму, контролировать динамику изменения температуры в заданных точках поверхности и отслеживать возможный перегрев приборов и элементов.

Для поддержания постоянной температуры атомных стандартов частоты (АСЧ) необходима специальная высокоточная система тепловой стабилизации – термостабилизированная платформа. Поэтому была разработана математическая модель нестационарного теплообмена в системе терморегулирования АСЧ КА. Модель основана на двумерных нестационарных уравнениях теплопроводности, описывающих теплообмен сотовой панели со встроеными тепловыми трубами и гипертеплопроводящими пластинами (ГТП) с учетом радиационного теплообмена. Модель учитывает пространственную неоднородность тепловых источников работающего стандарта частоты, пространственно-временной характер изменения внешнего теплового потока от солнечных, батарей, теплофизические характеристики блоков АСЧ. Был также разработан алгоритм управления электрическими нагревателями системы терморегулирования на основе широтно-импульсной модуляции длительности импульсов тока нагревателей. С помощью данной математической модели проведены расчеты температурных полей в системе терморегулирования с учетом детальной информации о конструкции сотовой панели, мощностей тепловыделения и теплоемкости блоков АСЧ, внешних тепловых условий. Результаты расчетов позволили оценить временные и пространственные температурные неоднородности посадочного места блока АСЧ, и провести оптимизацию конструкции системы терморегулирования и алгоритма управления с целью обеспечения требуемой температурной стабильности.

Более широкие возможности регулирования температуры предоставляет локальная система прецизионной термостабилизации (ЛСПТ), предназначенная для обеспечения высокостабильной температуры по площади посадочных мест отдельных блоков АСЧ. Основной особенностью конструкции ЛСПТ является размещение наиболее чувствительных к температурному режиму блоков на отдельном основании, температурный режим которого поддерживается с помощью термоэлектрических преобразователей (ТЭП). Это решение позволяет значительно снизить массу и площадь посадочных мест блоков, для которых осуществляется прецизионная термостабилизация. Использование гипертеплопроводящих оснований, имеющую высокую эффективную теплопроводность, позволяет многократно уменьшить перепады температуры по площади посадочных мест блоков и тем самым повысить точность временной стабилизации температуры. Применение ТЭП значительно расширяет возможности термостабилизации, поскольку это позволяет сочетать функцию терморегулирования с возможностью обеспечения необходимых тепловых режимов при значительных изменениях температуры радиационной поверхности. Величина разности температуры (радиационная поверхность – посадочные места чувствительных блоков) определяется мощностью отвода теплоты, которая в свою очередь регулируется величиной силы тока электропитания ТЭП. Для исследования динамики тепловых процессов, протекающих в ЛСПТ, была разработана математическая модель, основанная на численном решении нестационарных двумерных уравнений теплопроводности. В модели учитывается процесс теплопередачи в двух основаниях с учетом обмена тепловой энергией между ними, осуществляемого с помощью ТЭП. На основе математической модели была реализована компьютерная вычислительная программа, позволяющая рассчитывать температурные поля оснований ЛСПТ в зависимости от температуры посадочного места и режима электропитания ТЭП. По результатам проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что ЛСПТ позволяет поддерживать температуру блоков АСЧ в диапазоне 10...20 °С с точностью, достигающей  $\pm 0,01$  °С, при колебаниях температуры основания термопанели  $\pm 1$  °С.

В 2008 г. полномасштабный образец термостабилизированной платформы с гипертеплопроводящим основанием для стандартов частоты КА системы ГЛОНАСС прошел тепловые испытания в тепловакуумной камере ИВМ СО РАН. Проведена проверка точности стабилизации температуры основания АСЧ в различных режимах работы космического аппарата. Показано, что в рабочем режиме точность стабилизации составляет  $\pm 0,04$  °С, а в аварийном  $\pm 0,08$  °С.

Системы терморегулирования на борту космического аппарата могут успешно функционировать только на основе высокоточных систем измерения температуры. В настоящее время имеется множество видов температурных датчиков, позволяющих точно измерять температуру, но ни один из них не способен

сохранять свои характеристики в течение долгих лет работы спутника на орбите. Одним из решений данной проблемы является создание на борту космического аппарата специального устройства – стандарта температуры, основанного на том, что температура плавления и отвердевания некоторых веществ всегда постоянна с высокой точностью. Бортовой стандарт температуры был разработан совместными усилиями ИВМ СО РАН и ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева.

На период 2013–2015 гг. Решением Федерального космического агентства запланировано проведение космического эксперимента по отработке системы прецизионной термостабилизации АСЧ на базе ГТП на одном космическом аппарате «Глонасс-М». Это предполагает установку на КА в качестве полезной нагрузки модуля прецизионной термостабилизации, включающего ГТП, бортовой стандарт температуры. В условиях постоянно растущих требований к мощности и компактности электронной аппаратуры космического аппарата задача эффективного отвода теплоты становится настоящим вызовом и требует применения кардинально новых решений. Одним из таких решений является использование гипертеплопроводящих плоских структур, способных передавать теплоту на порядок эффективнее традиционных материалов.

Совместными усилиями ИВМ СО РАН, Уральско-го электрохимического комбината (г. Новоуральск) и ОАО «ИСС» были разработаны ГТП, обладающие эффективной теплопроводностью, превышающей теплопроводность алюминия более чем в 100 раз. В настоящее время ГТП выпускаются серийно и используются в радиоэлектронных блоках КА.

Надежность и долговечность КА зависит от каждого элемента бортовой аппаратуры, поэтому проверка надежности аппаратуры всегда являлась одним из важнейших этапов создания спутника. В ИВМ СО РАН была разработана методика тепловакуумных испытаний с помощью телловизионной измерительной системы, позволяющей решить задачу контроля качества, как самих радиоэлектронных элементов, так и качества их монтажа. Методика основана на использовании тепловакуумного стенда-камеры, обеспечивающего имитацию космических условий и оснащенного специальным измерительным оборудованием и программным обеспечением. В камеру помещаются модули бортовой аппаратуры, которые работают в условиях, приближенных к космическим. В автоматизированном режиме осуществляется наблюдение теплового поля всех элементов. Анализ температуры и других измеряемых характеристик позволяет выявить теплонапряженные узлы и заменить их (или улучшить качество монтажа). Тепловакуумный стенд для испытания элементов бортовой аппаратуры для космических аппаратов был спроектирован с непосредственным участием ИВМ СО РАН, изготовлен и введен в строй в ОАО «ИСС» в 2005 г. Сотрудничество ИВМ СО РАН с ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева успешно развивается.

Планируется участие ИВМ СО РАН в разработках концепции КА с использованием ГТПС.

По результатам совместных разработок ИВМ СО РАН и ОАО «ИСС» получены патенты [1–4], материалы исследований публиковались в научных журналах [5–10], докладывались на Российских и Международных научных конференциях [11–12]. Институт вычислительного моделирования СО РАН принимает активное участие в подготовке кадров для ОАО «ИСС». Между ИВМ СО РАН, ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева и Сибирским федеральным университетом подписано «Соглашение о стратегическом партнерстве». В рамках этого Соглашения на территории ИВМ СО РАН функционирует научно-учебная лаборатория «Проектирование космических систем и аппаратов» (руководитель В. А. Деревянко) межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» СФУ (зав. кафедрой В. Е. Косенко). Студенты, магистры и аспиранты кафедры участвуют непосредственно в выполнении научно-исследовательских работ и по окончании обучения направляются на работу в ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. РФ № 2240606. Устройство термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры / В. А. Деревянко, В. Е. Косенко, Е. Н. Васильев и др. Опубл. 20.11.2004, Бюл. №32.
2. Пат. РФ № 2403692. Модуль радиоэлектронной аппаратуры с гипертеплопроводящим основанием / С. Б. Сунцов, В. Е. Косенко, В. А. Деревянко. Опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
3. Пат. РФ № 2408919. Устройство термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры / В. Е. Чеботарев, В. Д. Звонарь, В. Е. Косенко и др. Опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.
4. Пат. РФ № 2457417. Металлическая тепловая труба плоского типа / А. Е. Буров, В. А. Деревянко, В. Е. Косенко и др. Опубл. 27.07.2012.
5. Васильев Е. Н., Дектерев А. А. Математическое моделирование процессов теплообмена в двухфазном контуре терморегулирования с капиллярным насосом // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 4 (21). С. 12–16.
6. Васильев Е. Н., Деревянко В. В. Программный комплекс для расчета температурных полей панелей космических аппаратов негерметичного исполнения // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 1. Ч. 2 (22). С. 8–14.
7. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко, В. Е. Косенко и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. Вып. 6. С. 19–28.
8. Васильев Е. Н., Деревянко В. В. Математическая модель процессов теплообмена в сотовой панели с тепловыми трубами // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2 (28). С. 4–7.
9. Деревянко В. А. Когда в космосе жарко // Наука из первых рук. 2011. № 1. С. 28–33.
10. Деревянко В. В. Применение Data Mining в космических приложениях // Исследования наукограда. 2012. Вып. 1 (1). С. 47–51.
11. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., Suntsov S. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes // Proceeding of the 15th International Heat Pipe Conference. Clemson, USA. April 25–30, 2010.
12. Derevyanko V., Nesterov D., Suntsov S. Experimental investigation of flat heat pipes to remove high heat fluxes // Proceeding of the 16th International Heat Pipe Conference. Lyon, France. May 20–24, 2012.

#### References

1. Patent RF № 2240606. *Ustroystvo termostabilizatsii radioelektronnoy apparatury* (Thermal stabilization device of radio electronic equipment). Derevyanko V. A., Kosenko V. E., Vasilyev E.N. et al. Date of pub. 20.11.2004, bull. no. 32.
2. Patent RF № 2403692. *Modul' radioelektronnoy apparatury s giperteploprovodyashchim osnovaniyem* (Module of radio-electronic equipment with hyperheatconducting base). Suntsov S. B., Kosenko V. E., Derevyanko V. A. Date of pub. 10.11.2010, bull. no. 31.
3. Patent RF № 2408919. *Ustroystvo termostabilizatsii radioelektronnoy apparatury* (Thermal stabilization device of radioelectronic equipment). Chebotarev V. E., Zvonar V. D., Kosenko V. E. et al. Date of pub. 10.01.2011, bull. no. 1.
4. Patent RF № 2457417. *Metallicheskaya teplovaya truba ploskogo tipa* (Metal heat pipe of flat type). Burov A. E., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. Date of pub. 27.07.2012, bull. no. 21.
5. Vasilyev E. N., Dekterev A. A. *Vestnik SibGAU*, 2008, no. 4 (21), p. 12–16.
6. Vasilyev E. N., Derevyanko V. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, no. 1, part 2 (22), p. 8–14.
7. Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2009, vol. 14, no. 6, p. 19–28.
8. Vasilyev E. N., Derevyanko V. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, no. 2 (28), p. 4–7.
9. Derevyanko V. A. *Nauka iz pervykh ruk*, 2011. № 1. pp. 28–33.
10. Derevyanko V. V. *Issledovaniya naukograda*, 2012, no. 1, p. 47–51.
11. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., Suntsov S. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes. Proceeding of the 15th International Heat Pipe Conference. Clemson, USA. April 25–30, 2010.
12. Derevyanko V., Nesterov D., Suntsov S. Experimental investigation of flat heat pipes to remove high heat fluxes. Proceeding of the 16th International Heat Pipe Conference. Lyon, France. May 20–24, 2012.