В.А. ДЕРЕВЯНКО

КОГДА В КОСМОСЕ ЖАРКО

Прошло немногим более полувека со дня запуска первого спутника, а космические технологии уже прочно вошли в нашу жизнь. Привычными стали регулярные полеты к МКС, космический туризм, спутниковая навигация и телевидение… Надежные космические аппараты нужны, как хорошие автомобили. Притом что на орбите нет станций технического обслуживания, обеспечение долговечности и эффективности работы всех элементов космического аппарата – главная задача разработчиков. Ключевую роль при этом играет система терморегулирования, ведь приборы, как и люди, нуждаются в «комфортной» температуре

ДЕРЕВЯНКО Валерий Александрович – кандидат физико-математических наук, руководитель научно-исследовательской группы тепловых систем космических аппаратов Института вычислительного моделирования СО РАН, научно-учебной лаборатории проектирования космических систем и аппаратов Сибирского федерального университета (Красноярск). Автор и соавтор более 120 научных работ и 13 патентов РФ



Одно из главных условий, гарантирующих надежность и долговечность сложного автономного робота, каким является спутник, – поддержание стабильного температурного режима работы всей бортовой аппаратуры. Эта задача далеко не проста, поскольку движущийся по орбите спутник находится в сложных и постоянно меняющихся тепловых условиях.

Режим работы самого аппарата периодически меняется: включаются и выключаются мощные электрические приборы, спутник заходит в тень Земли, вращаются нагретые солнечные панели, являющиеся источником переменного теплового облучения приборного отсека. В таких условиях задача обеспечения теплового режима работы каждого элемента космического аппарата возлагается на специальную систему терморегулирования. При этом сброс излишек тепла с аппарата осуществляется единственным способом – излучением в окружающее космическое пространство.

Обычная система терморегулирования космического аппарата включает в себя тепловые газожидкостные контуры, излучательные радиаторы, нагреватели, терморегулирующие покрытия и тепловые изоляторы. При этом важна правильная компоновка тепловыделяющих элементов, основанная на точном расчете тепловых режимов работы. После создания спутника система тщательно тестируется на земле, ведь в космосе уже ничего нельзя будет исправить.

Негерметичный – лучше!

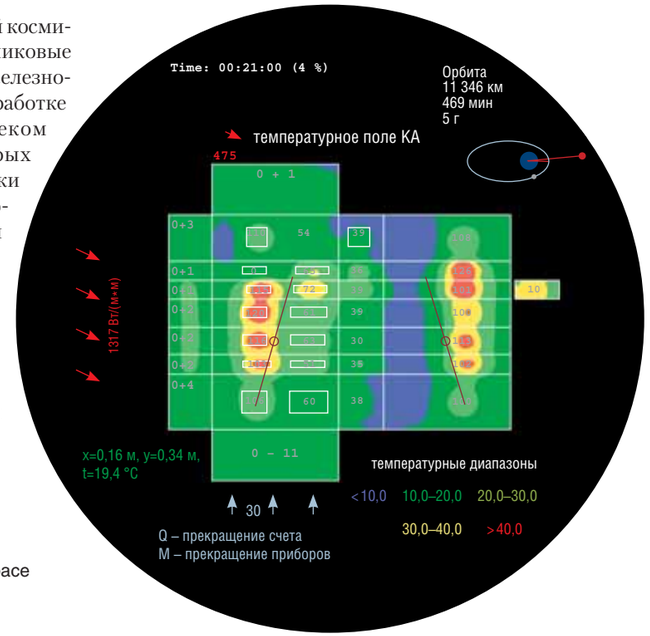
В 1990-х гг. на одном из ведущих предприятий космической отрасли ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва (г. Железногорск, Красноярский край) приступили к разработке космических аппаратов с приборным отсеком негерметичного исполнения, аналоги которых уже существовали за рубежом. Такие спутники являются более легкими, надежными и долговечными, однако отсутствие воздушной среды в приборном отсеке, обычно использовавшейся для отвода тепла, потребовало разработки новых принципов теплового проектирования приборов и способов сброса тепла на излучательные радиаторы.

С работы над этим проектом и началось сотрудничество ОАО «ИСС» с Институтом вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск). Вообще взаимодействие академической и отраслевой науки всегда было достаточно сложным процессом как в силу различных подходов к решению задач, так и в силу различной ответственности за результат. Однако ситуация на этот раз была благоприятной: разработка принципиально новой конструкции космического аппарата требовала новых идей и новых технических решений. Нужны были энтузиасты и с той и с другой стороны.

Одной из первых «космических» разработок ученых стала вычислительная модель теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения, которая базировалась на накопленном в институте большом опыте решения трехмерных нестационарных задач тепломассообмена.

Даже на современной вычислительной технике полное решение подобных задач требует слишком много времени, поэтому исследователями была предложена так называемая иерархическая модель. Ее основная идея заключалась в том, что нет необходимости детально просчитывать температурный режим каждого

В ИВМ СО РАН была разработана модель теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения. Вычислительное моделирование помогает определить оптимальную конструкцию спутника и найти оптимальную компоновку бортовой аппаратуры, при которой каждый прибор работает в требуемом температурном диапазоне



Ключевые слова: вычислительное моделирование, теплофизика, космические аппараты, системы терморегулирования.
Key words: computational modeling, thermal physics, space vehicles, systems of thermoregulation



Внутри тепловакуумного стенда одного из ведущих предприятий космической отрасли ОАО «Информационные спутниковые системы» проходит проверку вся радиоэлектронная аппаратура, отправляемая на орбиту для работы в сложных космических условиях

мелкого тепловыделяющего элемента, пока не оценен допустимый тепловой баланс целых узлов.

В результате был создан пакет прикладных программ для расчета теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения, движущегося по произвольной орбите, с учетом эффективной теплоемкости конструкции и приборов, теплового сопротивления посадочных мест и переменной теплопроводности радиационных панелей.

Эти разработки ИВМ стали составной частью проекта, который был реализован в рамках Федеральной космической программы и завершился созданием «Интегрированной многоуровневой системы Градиент-2 проектирования КА блочно-модульного исполнения».

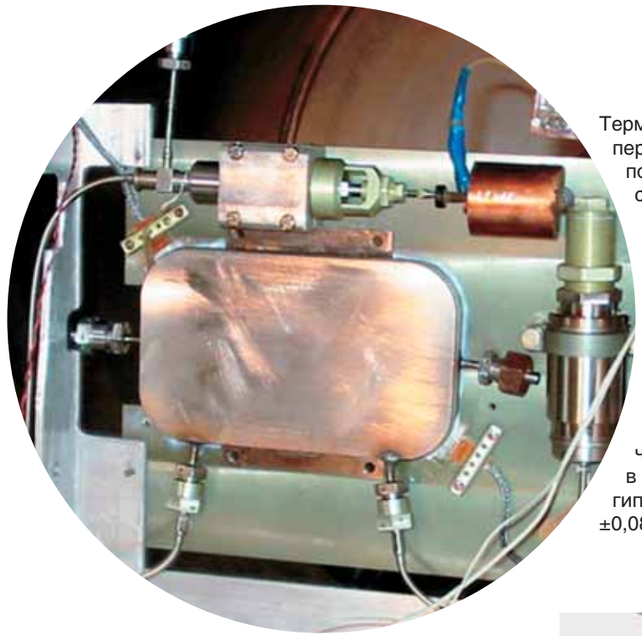
Космос в масштабе стенда

Долговечность космического аппарата зависит от каждого элемента бортовой аппаратуры, поэтому проверка ее надежности – один из важнейших этапов создания спутника.

Сейчас эта задача стала особенно актуальной. Еще в 2000-х гг. срок службы космических аппаратов связи и навигации не превышал пяти лет, сейчас же он увеличился до 15 и более лет. Для создания таких аппаратов требуются точные современные методы контроля качества, гарантирующие их надежную работу на протяжении всего срока службы. Конечно, имеющиеся математические модели теплового режима можно использовать для расчета тепловых режимов отдельных электронных блоков и оптимизации их расположения, однако в расчетах невозможно учесть все технологические разбросы параметров теплового обмена в условиях реальной работы аппаратуры.

Поэтому в ИВМ была разработана методика тепловакуумных испытаний с помощью тепловизионной измерительной системы. Методика основана на использовании тепловакуумного стенда – камеры, обеспечивающей имитацию космических условий и оснащенной специальным измерительным оборудованием и программным обеспечением. В камеру помещаются модули с бортовой аппаратурой, а затем в условиях, приближенных к реальным, в автоматизированном режиме осуществляется наблюдение за тепловым полем всех элементов. Анализ температурных данных позволяет выявить теплонапряженные узлы и заменить их или улучшить качество монтажа.

Такой тепловакуумный стенд для испытания элементов бортовой аппаратуры был изготовлен и введен в строй в ОАО «ИСС» в 2005 г. С того времени на этом стенде проходят проверку все радиоэлектронные приборы, предназначенные для использования на борту космических аппаратов.



Термостабилизированная панель с фазовым переходом *(фото слева)* обеспечивает постоянную температуру поверхности с точностью до десятых долей градуса Цельсия при изменении тепловой нагрузки в пределах 5 Вт

Термостабилизированная платформа с гипертеплопроводящим основанием использовалась для атомных часов спутника «ГЛОНАСС». Испытания, проведенные на тепловакуумном стенде ОАО «Информационные спутниковые системы» *(фото внизу)*, показали, что точность стабилизации температуры в аварийном режиме при выходе из строя гипертеплопроводящего основания составляет ±0,08 °С, а в рабочем режиме – вдвое выше

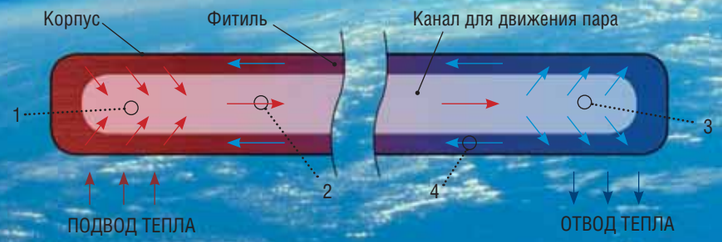
Термостабильное… время

На каждом космическом аппарате имеется высокоточная бортовая шкала времени, для которой требуются высокостабильные генераторы частоты. Такие бортовые часы особенно важны для навигационных спутников, так как определение координат на поверхности Земли происходит по измерению расстояния от точки до самих космических аппаратов с использованием специальных сигналов, содержащих оцифрованную шкалу времени и сетку стабильных импульсов. И чтобы определить расстояние с точностью до метра, бортовая шкала времени должна отличаться от наземной не более чем на 3 нс!

На борту современных навигационных космических аппаратов используются атомные часы на основе цезиевых или рубидиевых стандартов частоты, требующие поддержания рабочей температуры с точностью до долей градуса. В конечном счете тщательность соблюдения температурного режима работы таких часов определяет точность полученных координат. Для поддержания постоянной температуры используется специальная высокоточная система тепловой стабилизации – термостабилизированная платформа, включающая температурные датчики, тепловые трубы, электрические нагреватели и систему управления, функционирующую по специальному алгоритму.

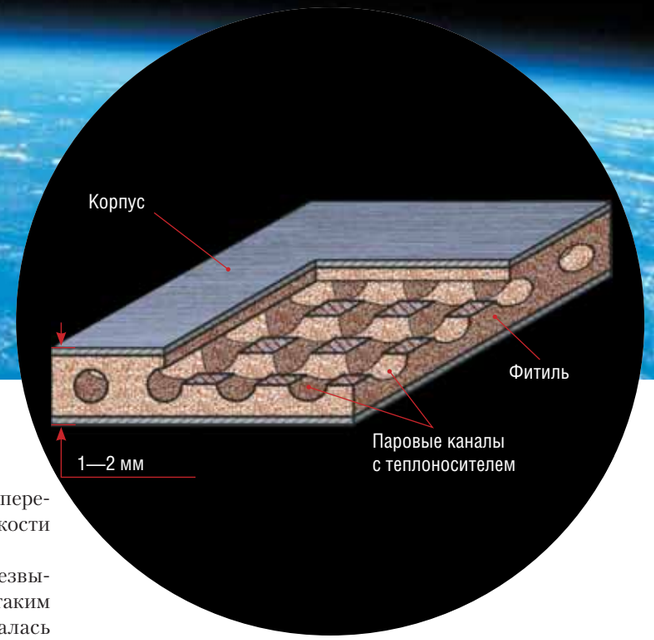
Создание прецизионных систем термостабилизации для негерметичных приборных отсеков спутников было начато в 2001 г. с разработки термостабилизированных панелей с фазовым переходом, обеспечивающих пассивное (без затрат электрической энергии) регулирование температуры посадочного места с точностью ±0,1 °С (патент № 2240606, 2004). Такая панель особенно хо-





Этапы теплового цикла:
1. Испарение жидкости и поглощение тепла.
2. Движение пара к холодной области.
3. Конденсация пара и выделение тепла.
4. Движение жидкости к горячей области

Гипертеплопроводящие панели представляют собой металлические пластины толщиной 2 мм и размерами до 100—300 мм со сложной внутренней структурой. Они могут служить чрезвычайно эффективными основаниями для монтажа компактной радиоэлектронной аппаратуры



Секрет эффективности гипертеплопроводящих панелей заключается в том, что они представляют собой миниатюрные двухмерные версии известных тепловых труб. Классическая тепловая труба *(вверху)* представляет собой герметичную трубу, на внутренней стенке которой располагается фитиль с жидким теплоносителем. При нагреве одного из концов такой трубы жидкий теплоноситель из фитиля начинает испаряться и в виде пара перемещаться к противоположному концу, где конденсируется и снова впитывается в фитиль. За счет капиллярных сил фитиля жидкость постоянно возвращается к месту подвода тепла

рошо подходит для малогабаритных приборов, иначе ее вес будет слишком велик.

Поскольку реальные атомные часы достаточно велики, в их системе терморегулирования были использованы гипертеплопроводящие панели, основанные на переносе тепла при фазовом переходе жидкость–пар. Система терморегулирования включает также датчики температуры и электрические нагреватели. Точность стабилизации зависит от многих факторов, что потребовало разработки математической модели нестационарного теплообмена, а также алгоритма управления электрическими нагревателями.

В 2008 г. полномасштабный образец термостабилизированной платформы с гипертеплопроводящим основанием для атомных часов спутников «ГЛОНАСС» прошел испытания в тепловакуумной камере института: в рабочем режиме точность стабилизации температуры составила ±0,04 °С.

В сто раз лучше алюминия

Задача прецизионной термостабилизации оказалась многогранной. Ее решение потребовало, в частности, создания устройств для пространственного выравнивания температур в месте установки атомных часов. В результате появилось и развилось новое направление по созданию гипертеплопроводящих панелей. Его актуальность связана с тем, что в условиях постоянно растущих требований к мощности и компактности электронной аппаратуры космического аппарата задача эффективного отвода тепла стала настоящей проблемой, требующей кардинально новых решений.

Одним из таких решений является использование гипертеплопроводящих плоских структур, способных передавать тепло на порядки эффективнее традиционных материалов. Совместными усилиями ИВМ СО РАН, Уральского электрохимического комбината (г. Новоуральск) и ОАО «ИСС» были разработаны гипертеплопроводящие панели, эффективная теплопроводность которых в 100 раз превышает теплопроводность алюминия!

Гипертеплопроводящие панели являются не новым материалом, а настоящим компактным тепловым устройством со сложной внутренней структурой. В основу их создания легла концепция так называмой *тепловой трубы*.

Классическая тепловая труба представляет собой запаянную с обеих сторон герметичную трубу, на внутренней стенке которой располагается фитиль, содержащий жидкий теплоноситель. При нагреве одного из концов такой трубы жидкий теплоноситель начинает испаряться из фитиля и в виде пара перемещаться к противоположному концу, где конденсируется и снова впитывается в фитиль. За счет капиллярных сил фитиля жидкость постоянно возвращается к месту подвода тепла. Замечательным свойством такого устройства является то, что для передачи большого количества тепла требуется очень маленький перепад температуры, при этом не нужно никаких насосов и вообще движущихся частей.

Гипертеплопроводящая панель является двухмерной тепловой трубой. Внутри тонкой плоской панели находится заполненный жидким теплоносителем пористый материал. Внутренняя структура каналов в пористом материале такова, что теплоноситель способен перемещаться в любом направлении вдоль всей плоскости панели, обеспечивая перенос тепла.

Вычислительное моделирование показало чрезвычайно высокую эффективность передачи тепла таким устройством. Самой сложной проблемой оказалась разработка самой технологии изготовления, однако эти трудности удалось преодолеть. Экспериментальные исследования образцов гипертеплопроводящих панелей подтвердили, что они обладают всеми ожидаемыми характеристиками.

Точность во всем

Высокоточные системы терморегулирования требуют и соответствующих высокоточных систем измерения температуры. Однако ни один из видов современных температурных датчиков не способен сохранять свои характеристики в течение долгих лет работы спутника на орбите. Со временем, медленно, но неизбежно, их характеристики меняются, а жесткие космические условия только ускоряют этот процесс.

В результате работа систем термостабилизации ухудшается, что снижает надежность спутника в целом. Одним из решений этой проблемы является создание специального устройства – бортового стандарта температуры, пригодного для калибровки температурных датчиков прямо в космическом полете.

Принцип работы этого устройства основан на том факте, что температура плавления и отвердевания некоторых веществ с высокой точностью постоянна. Такие вещества называются *эвтектическими сплавами*. Например, температура плавления сплава галлия и индия (Ga–In) равна 15,3 °С. И задача измерения температуры сводится в результате к сравнению температуры с эталонной температурой плавления эвтектического сплава.

Подобный бортовой стандарт температуры был также разработан совместными усилиями специалистов института и ОАО «ИСС».

Тепловое проектирование космических аппаратов представляет собой интересную и важную область, требующую продолжения сложного комплекса фундаментальных, вычислительных и экспериментальных работ.

В частности, в 2012 г. запланирован космический эксперимент на аппарате «ГЛОНАСС-М» для проверки системы прецизионной термостабилизации атомных часов. Это первые образцы гипертеплопроводящих пластин, которые будут тестироваться непосредственно в реальных условиях.

Более того, хотя гипертеплопроводящие панели создавались для применения в космических аппаратах, эти уникальные устройства могут быть с успехом использованы и в наземных приложениях, в частности в радиоэлектронике для повышения эффективности охлаждения процессоров в вычислительных машинах или отвода тепла от мощных излучающих светодиодов и светодиодных матриц.

Литература

Деревянко В.А., Васильев Е.Н., Нестеров Д.А. и др. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов // Вычислительные технологии. 2009. Т.14, № 6.

Чеботарев В.Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения: учеб. пособие в 2 кн. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2004. Кн.1. 132 с.; Кн. 2. 2005. 168 с.

Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И. и др. Моделирование тепловых режимов КА и его окружающей среды. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.