

О моделировании управления тепловым состоянием блоков научной аппаратуры космических аппаратов

Ю.Н. Горелов¹, С.Б. Данилов¹, Л.В. Курганская¹, А.В. Щербак¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Дано краткое описание научной аппаратуры КАРБОН, МРТ и СИГМА для автоматических космических аппаратов «Бион-М» №1, «Фотон-М» №4, предназначенной для проведения ряда космических экспериментов. Отмечается высокая функционально-структурная автономность этой аппаратуры. В связи с разработкой научной аппаратуры СИГМА-2 для космического аппарата «Бион-М» №2 рассматриваются постановка задачи оптимизации степени ее функционально-структурной автономности и подход к решению такой задачи методом математического моделирования на примере проектирования системы терморегулирования отдельных модулей аппаратуры.

1. Введение

В последние десятилетия проведение фундаментальных и прикладных исследований влияния факторов космического полета на различные физико-химические, технологические и биологические процессы непосредственно связано с применением специализированной научной аппаратуры (НА), с помощью которой проводятся соответствующие космические эксперименты (КЭ) [1-3]. В 1970...2000-х годах на борту автоматических космических аппаратов (КА) «Фотон» и «Бион» были проведены многочисленные медико-биологические и технологические КЭ [1,3]. В 2013 г. для проведения исследований в области космической медицины и биологии был запущен КА нового поколения «Бион-М» № 1, а затем разработанный на его базе КА «Фотон-М» № 4, полет которого состоялся в 2014 г. [6]. Разработка такой аппаратуры, как правило, носит уникальный характер и сопряжена с выполнением определенных требований к ее функционированию на борту автоматических космических аппаратов (КА) в течение всего полета [3-5], включая участки выведения на орбиту и возвращения спускаемого аппарата на Землю.

Включение в состав КА и соответствующее взаимодействие НА с его служебными системами требует выполнения также некоторых дополнительных условий функциональной и структурной автономности НА, в основном связанных с особенностями проведения того или иного КЭ. Такую автономность НА можно определить как характером и степенью интеграции НА с бортовыми системами и конструкцией КА, так и условиями реализации соответствующих интерфейсов НА, а именно: механического, электрического, информационно-управляющего интерфейсов и т.п. Кроме того, условия автономности НА можно связать, например, со степенью независимости регулирования теплового состояния конструкции НА в целом или ее отдельных частей, с условиями электромагнитной совместимости НА и оборудования КА и т.д.

В связи с этим здесь рассматриваются: во-первых, примеры условий функциональной и структурной автономности НА КАРБОН, МРТ и СИГМА, которые были разработаны специалистами и учеными самарских университетов и научных организаций с целью проведения ряда технологических и медико-биологических КЭ на КА «Бион-М» № 1 и «Фотон-М» № 4 [6]; во-вторых, возможная реализация подхода учета условий функционально-структурной автономности НА при проектировании типовых термостатируемых отсеков аппаратуры СИГМА-2 для КА «Бион-М» № 2 [6] с помощью математического моделирования.

2. Постановка задачи оптимизации степени функционально-структурной автономности научной аппаратуры для проведения космических экспериментов

Предваряя постановку задачи оптимизации, вначале дадим общее определение функционально-структурной автономности применительно к НА для проведения КЭ на автоматических КА. Как было отмечено во введении указанная автономность НА характеризуется прямым или косвенным потреблением соответствующих ресурсов КА, необходимых для нормального функционирования НА для решения задач проводимых с ее помощью КЭ. Кратко приведем качественные оценки автономности НА КАРБОН, МРТ и СИГМА.

Описание НА КАРБОН приведено в [7]. Цель одноименного КЭ КАРБОН – исследование влияния факторов космического пространства на стойкость карбидокремниевых структур при их экспонировании в условиях открытого космического пространства на внешней поверхности спускаемого аппарата КА «Бион-М» № 1. Основные требования к НА КАРБОН заключались в обеспечении надежного механического интерфейса НА и исследуемых образцов структур SiC на изолирующих подложках, с которыми были проведены необходимые до- и послеполетные исследования параметров и электрофизических характеристик [6,7]. В этом случае имеет место предельная функционально-структурная автономность НА КАРБОН.

Научная аппаратура МРТ (многоканальный регистратор температур) была разработана для КА «Фотон-М» № 4 для мониторинга в течение всего полета теплового состояния конструкции контейнеров для НА, располагаемой на внешней поверхности спускаемого аппарата КА [6-8]. Измерение текущих температур (с дискретностью 10 с) на всех этапах полета необходимо как для контроля условий проведения ряда КЭ на внешней поверхности КА, так и для интерпретации полученных результатов. В состав МРТ входили датчики температуры (типа HRTS-5760-B), которые устанавливались в заданных точках на стенках контейнеров НА, и блок регистрации данных, размещаемый в герметичном объеме КА (на приборной раме в спускаемом аппарате). Блок регистрации данных и датчики температуры (которые непосредственно наклеиваются на стенки контейнера НА) соединены кабелем, проходящим через герметичный разъем на корпусе спускаемого аппарата, то есть НА МРТ является интегрированной в конструкцию КА. В МРТ использован автономный источник питания (батарея) и, соответственно, не предусматривались съем телеметрической информации и передача с наземного комплекса управления команд управления. То есть НА МРТ полностью функционально автономна, но структурно интегрирована с конструкцией КА.

Основные результаты проведенного КЭ с НА МРТ, полученные после обработки и анализа экспериментальных данных, связаны с выявлением основных факторов, определявших тепловое состояние конструкции контейнеров НА при полете КА «ФОТОН-М» № 4. К ним относится положение контейнеров на поверхности КА, полет которого происходит в режиме ориентации панелей солнечных батарей на Солнце, и текущее положение плоскости орбиты относительно направления на Солнце [6, 8].

Научная аппаратура СИГМА была разработана для проведения 12 медико-биологических КЭ на борту «Фотон-М» № 4 [6], в том числе: 2 с клеточными культурами, 4 с различными видами микроорганизмов и 6 с семенами растений. В состав НА СИГМА входили три автономных блока, два из которых были предназначены для проведения КЭ с клеточными культурами. В состав этих блоков входили автономные источники питания (батареи), элементы систем терморегулирования и регистрации данных. Контейнеры (5 мл пробирки) с исследуемыми биообъектами (клеточные культуры в ростовой среде) попарно размещались в 12 универсальных модулях регистрации, которые имели автономные подсистемы измерения и

регистрации параметров биообъектов. Снаряженные блоки имели массу, соответственно, 12,4 и 11,5 кг. Масса второго блока меньше массы первого в силу меньшего числа источников питания, что позволило дополнительно разместить в нем укладки с набором некоторых семян. Остальные биообъекты были размещены в третьем блоке НА с массой 11,4 кг. НА СИГМА являлась для КА «Фотон-М» № 4 полностью автономной аппаратурой, что было обусловлено особенностями проведения КЭ, в первую очередь, с клеточными культурами.

Летные испытания НА СИГМА подтвердили ее работоспособность и правильность принятых технических решений при ее создании. Все космические эксперименты были выполнены в полном объеме, а их результаты, в том числе экспонированные в полете биообъекты, до настоящего времени изучаются разработчиками КЭ [10-13]. Предварительные результаты проведенных экспериментов также предопределили содержание научной программы для КА «Бион-М» № 2 в части проведения с помощью разрабатываемой НА СИГМА-2 ряда КЭ с клеточными культурами, микроорганизмами, семенами и клеточной тканью растений [6].

Предварительное проектирование НА СИГМА-2 показало, что не представляется возможным обеспечить ее максимально возможную степень функционально-структурной автономности в силу особенностей планируемых КЭ [6] и необходимости достаточно развитого интерфейса со служебными системами КА, в первую очередь, с системами его бортового электропитания и терморегулирования. Кроме того, в течение всего полета требуется контроль функционирования НА (в основном в части проведения КЭ с клеточными культурами). В силу необходимости поддержания требуемых температурных режимов отдельных частей НА ее энергопотребление оказывается достаточно высоким, что исключает применение автономных источников питания из-за значительного увеличения массы НА в этом случае. Таким образом, в сравнении с НА СИГМА функционально-структурная автономность аппаратуры СИГМА-2 будет существенно ниже. Причем существенно различающиеся условия проведения с ее помощью КЭ потребовали многоблочности конструкции этой НА, но при сохранении электрических связей между ними с целью обеспечения электропитания блоков, передачи команд управления и регистрируемых данных и формирования телеметрической информации.

В связи с постановкой задачи оптимизации степени автономности НА СИГМА-2, отметим, что проведенный анализ конструктивных вариантов обеспечения требуемых характеристик НА показал, что наибольшее влияние на степень функциональной автономности НА оказывает ее система терморегулирования, обеспечивающая требуемое тепловое состояние отдельных частей (модулей) НА. Режимы работы этой системы определяют тепловые потоки как между модулями НА, так и между ее модулями и внутренним объемом спускаемого аппарата. В свою очередь система терморегулирования в значительной степени определяет и потребное электропитание НА. Таким образом, при оптимизации функциональной автономности (с учетом проведенной структурной декомпозиции НА на блоки по группам КЭ в соответствии с направлениями исследований [6]) необходимо, обеспечивая требуемые температурные режимы для биообъектов (от +5°C до +37°C) как в течение полета, так и на пред- и послеполетном этапах, минимизировать теплообмен между НА и внутренним объемом спускаемого аппарата, а также ее пиковые и суммарные уровни электропотребления. Учитывая нестационарный характер температурных полей внутри спускаемого аппарата в течение полета, что обусловлено работой и другой НА, эффективное решение сформулированной задачи оптимизации степени автономности для данной НА возможно только с помощью метода математического моделирования, что требует в свою очередь соответствующей модели управления тепловым состоянием отдельных блоков (модулей) НА СИГМА-2.

3. О моделировании управления тепловым состоянием блоков НА СИГМА-2

Конструктивно НА СИГМА-2 имеет не только деление на блоки, но и отдельные ее блоки в свою очередь могут включать модули, температурные режимы которых различны. Поэтому в состав математической модели теплового состояния НА будут входить несколько моделей для отдельных модулей, в основу которых будет положена следующая обобщенная расчетная схема моделирования теплового состояния в виде некоторого изолированного объема камеры с находящимися в ней несколькими контейнерами (например, с какими-либо биообъектами), для

которых требуется поддержание вполне определенных температурных режимов, необходимых для проведения соответствующих КЭ. Внутри такой камеры, как и в спускаемом аппарате КА, предполагается наличие газовой среды (воздух). В условиях космического полета естественная конвекция отсутствует, поэтому теплообмен между газовой средой, контейнерами и стенками камеры должен обеспечиваться посредством вынужденной конвекции, осуществляющейся посредством вентиляции объема камеры. Следует отметить, что устройства, обеспечивающие вентиляцию камеры, как правило являются источниками тепла. В качестве исполнительных органов системы терморегулирования могут быть как омические нагреватели, так и элементы Пельтье [14]. Очевидно, элементы Пельтье могут использоваться и как источники тепла, и как органы для сброса тепла из камеры либо непосредственно во внутренний объем спускаемого аппарата, либо в соседний модуль, имеющий общую стенку с рассматриваемым модулем. Для того, чтобы обеспечить эффективную работу элементов Пельтье, необходимо обеспечивать достаточно интенсивный обдув газовой средой их рабочих поверхностей. Если рабочая поверхность такого элемента является внешней поверхностью стенки камеры, то ее обдув должен обеспечиваться системой вентиляции внутреннего объема спускаемого аппарата.

Основными параметрам исполнительного органа – элемента Пельтье являются: S_{Π} – площадь рабочей поверхности (внешней и внутренней); P_{Π} – коэффициент Пельтье; R_{Π} – сопротивление элемента Пельтье. Текущее состояние элемента Пельтье характеризуется следующими параметрами: I_{Π} – сила пропускаемого тока; T_1 и T_2 – температуры внутренней и внешней рабочих поверхностей элемента Пельтье. Соответственно, при пропускании через элемент Пельтье тока $I_{\Pi} > 0$ на его противоположных поверхностях выделяется количество теплоты:

$$\delta Q_{\Pi}^{(+)} = \left(\frac{1}{2} R_{\Pi} I_{\Pi}^2 + P_{\Pi} I_{\Pi} \right) dt; \quad \delta Q_{\Pi}^{(-)} = \left(\frac{1}{2} R_{\Pi} I_{\Pi}^2 - P_{\Pi} I_{\Pi} \right) dt, \quad (1)$$

где $P_{\Pi} I_{\Pi} dt$ – тепло Пельтье, а $R_{\Pi} I_{\Pi}^2 / 2$ – джоулево тепло. Соотношения (1) имеют место и при $I_{\Pi} < 0$ и сохранении индексов в δQ_{Π} (где «+» – индекс внешней, а «-» – внутренней поверхности).

При конвективном теплообмене количество передаваемой (или получаемой) теплоты [15] от поверхности к омывающей ее газовой среды равно:

$$\delta \hat{Q}_{\Pi}^{(+)} = \alpha_{\Pi} S_{\Pi} (T_1 - T_K) dt, \quad \delta \hat{Q}_{\Pi}^{(-)} = \alpha_{\Pi} S_{\Pi} (T_2 - T_{CA}) dt, \quad (2)$$

где T_K – температура газовой среды камеры, омывающей внутреннюю поверхность элемента Пельтье, T_{CA} – температура газовой среды спускаемого аппарата, а α_{Π} – коэффициент теплоотдачи; его значение определяется не только теплофизическими характеристиками теплообменной поверхности и омывающей ее газовой среды, но многими другими факторами. Очевидно, что с учетом (1) и (2) должно иметь место:

$$\delta Q_{\Pi}^{(+)} = \delta \hat{Q}_{\Pi}^{(+)}; \quad \delta Q_{\Pi}^{(-)} = \delta \hat{Q}_{\Pi}^{(-)}, \quad (3)$$

и, стало быть, температуры его рабочих поверхностей можно определить, не рассматривая тепловое состояние элемента Пельтье. В общем случае, элемент Пельтье рассматривается как тонкая стенка.

Для исполнительных органов – омических нагревателей (или источников тепла) имеет место:

$$\delta Q_{\Pi} = \frac{1}{2} R_{\Pi} I_{\Pi}^2 dt, \quad (4)$$

где R_{Π} – сопротивление, а I_{Π} – сила пропускаемого тока.

С помощью соотношений (1)-(4) формируется модель исполнительных органов системы терморегулирования камеры.

Дополнительными источниками и стоками тепла в камере являются ее стенки и контейнеры. Для описания процессов теплообмена в этом случае также используется закон Ньютона [15] и в общем случае здесь моделируется система с распределенными параметрами и запаздываниями. При этом внешним возмущающим фактором является нестационарное тепловое состояние

газовой среды внутри спускаемого аппарата КА, температура которой $T_{CA}(t)$ зависит от множества источников тепла, а именно: бортового оборудования, другой НА и т.п.

Следует отметить, что процессы, протекающие внутри камеры, являются строго изохорными и, с учетом инерционности тепловых процессов (в сравнении с процессами перемешивания газовой среды), также должны быть близки к изотермическим процессам.

В конечном счете, уравнения теплового состояния рассматриваемой камеры и находящихся в ней контейнеров будут представлены уравнениями изменения количества тепла в газовой среде камеры и контейнерах. Соответственно, это потребует интегрирования секундных количеств теплоты по всей внутренней поверхности камеры и внешней поверхности располагаемых в ней контейнеров, вообще говоря, с учетом процессов теплообмена и перемешивания газовой среды камеры. Очевидно, что определение параметров для получаемых таким образом уравнений теплового состояния камеры представляют собой решение практически весьма сложной задачи, поэтому их определение возможно только экспериментальным путем, например, на этапе макетирования (предваряя создание опытного образца) разрабатываемой НА СИГМА-2.

Итак, общая модель теплового состояния и системы терморегулирования НА СИГМА-2 будет представлена совокупностью соответствующих моделей для ее отдельных блоков и их модулей. Управляющие параметры в этой модели – токи (типа I_{II} и I_{II} в (1), (4)) для каждого из модулей, а внешнее возмущение задается в виде некоторого набора некоторых типовых моделей $T_{CA}(t)$.

Согласно общей постановке задачи оптимизации требуется, чтобы минимизировался обмен потоками тепла между НА и внутренним объемом КА при ограничении мощности потребляемого от бортовых источников электропитания НА. Поэтому показателем качества решения задачи для набора заданных режимов в виде зависимостей $T_{CA}(t)$ на некотором интервале $[t_0, t_f]$ ($t_f < \infty$) является суммарное количество тепла НА, выделяемого на указанном интервале.

Решение этой задачи позволит, с одной стороны, найти законы управления для системы терморегулирования проектируемой НА, а с другой стороны, максимизировать степень ее функциональной автономности.

Постановка задачи оптимизации и изложенный подход к ее решению с учетом предлагаемой модели системы терморегулирования НА позволяет, в конечном счете, сформулировать ведущий принцип создания НА для автоматических КА в виде принципа максимизации функционально-структурной автономности такой НА.

4. Заключение

Отмечена высокая степень функционально-структурной автономности НА КАРБОН, МРТ и СИГМА, разработанной для КА «Бион-М» № 1 и «Фотон-М» № 4. Рассматривается постановка задачи оптимизации степени функционально-структурной автономности НА СИГМА-2 для КА «Бион-М» №2. Изложен подход к построению математической модели управления тепловым состоянием этой НА и ее основные элементы. Сформулирован принцип оптимизации степени функционально-структурной автономности НА для автоматических КА.

5. Литература

- [1] Кирилин, А.Н. Космические аппараты «Бион» и «Бион-М»: вчера, сегодня, завтра / Космический научный проект «Бион-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования // А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов и др. – М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2016. – С. 9-16.
- [2] Сычев, В.Н. Проект «Бион-М1»: общая характеристика проекта / Космический научный проект «Бион-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования / В.Н. Сычев, Е.А. Ильин, Е.Н. Ярманова. – М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2016. – С. 58-69.
- [3] Кирилин, А.Н. Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов, А.Д. Сторож. – Самара: Изд-ский дом «АГНИ», 2011. – 280 с.

- [4] Козлов, Д.И. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д.И. Козлов, Г.П. Аншаков, В.Ф. Агарков. – М.: Машиностроение, 1996. – 448 с.
- [5] Гуцин, В.Н. Основы устройства и конструирования космических аппаратов / В.Н. Гуцин, Б.М. Панкратов, А.Д. Родионов. – М.: Машиностроение, 1992. – 256 с.
- [6] Горелов, Ю.Н. Научная аппаратура КАРБОН, МРТ и СИГМА для проведения космических экспериментов на борту космических аппаратов «БИОН-М» № 1 и «ФОТОН-М» № 4 / Ю.Н. Горелов, Л.В. Курганская, А.В. Щербак // Известия СамНЦ РАН. – 2016. – Т. 18, № 4(6). – С. 1039-1047.
- [7] Абрашкин, В.И. Эксперимент «КАРБОН» на космическом аппарате «БИОН-М» № 1 / В.И. Абрашкин, Ю.Н. Горелов, Л.В. Курганская, А.В. Щербак // Известия СНЦ РАН. – 2013. – Т. 15, № 6. – С. 210-217.
- [8] Курганская, Л.В. Космический эксперимент с научной аппаратурой «МРТ» на борту КА «Фотон-М» № 4 // Вестник Самарского государственного университета. – 2014. – Т. 10, № 121. – С. 140-152.
- [9] Курганская, Л.В. Научная аппаратура для проведения космических экспериментов на борту КА «Бион-М» № 1 и «Фотон-М» № 4 // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. – 2014. – № 1. – С. 67-75.
- [10] Абрашкин, В.И. О предварительных результатах космического эксперимента с семенами высших растений на КА «Бион-М» №1 / В.И. Абрашкин, Ю.Н. Горелов, Л.В. Курганская // Вестник СамГУ. – 2013. – Т. 9/1, № 110. – С. 140-150
- [11] Волова, Л.Т. Процессы жизнедеятельности клеток соединительных и опорных тканей человека *in vitro* / Космический научный проект «Бион-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования / Л.Т. Волова, В.В. Болтовская, В.В. Россинская. – М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2016. – С. 458-467.
- [12] Горелов, Ю.Н. Результаты космического эксперимента с семенами редких растений природной флоры / Космический научный проект «Бион-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования / Ю.Н. Горелов, Л.М. Кавеленова, Л.В. Курганская. – М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2016. – С. 486-493.
- [13] Милёхин, А.В. Первичные результаты космического эксперимента с семенами хозяйственно-полезных сельскохозяйственных культур на космическом аппарате ФОТОН-М № 4 / А.В. Милёхин, П.Н. Мальчиков, А.И. Катюк // Известия СамНЦ РАН. – 2015. –Т. 17, № 4(3). – С. 596-601.
- [14] Сивухин, С.Д. Общий курс физики. – М.: Наука, 1977. – Т.3. Электричество. – С. 490-494.
- [15] Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 736 с.

About modeling of thermal condition control of the spacecraft scientific equipment blocks

Yu.N. Gorelov¹, S.B. Danilov¹, L.V. Kurganskaya¹, A.V. Shcherbak¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. A brief description of the scientific equipment CARBON, MRI and SIGMA for automatic spacecraft "Bion-M" №1, "Photon-M" №4, designed for a number of space experiments. The high functional and structural autonomy of this equipment is noted. In connection with the development of scientific equipment SIGMA-2 for the spacecraft "Bion-M" №2, the problem of optimizing the degree of its functional and structural autonomy and the approach to solving this problem by mathematical modeling on the example of the design of the thermal control system of individual modules of the equipment are considered.