ОБОЗРЕНИЕ ПРИКЛАДНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ Том 26 МАТЕМАТИКИ

Выпуск 2

2019

Ю. Н. Горелов, С.Б.Данилов, Л. В. Курганская, А. В. Щ е р б а к (Самара, Самарский национальный исследовательский ун-т им. академика С. П. Королёва). Моделирование теплового состояния научной аппаратуры для автоматических космических аппаратов.

Изучение влияния факторов космического полета на технологические, физикохимические и биологические процессы непосредственно связано с применением научной аппаратуры (НА) для проведения соответствующих космических экспериментов (КЭ) [1–3]. Разработка такой НА носит уникальный характер из-за необходимости выполнения определенных требований к ее функционированию на борту автоматических космических аппаратов (КА) в течение всего полета [4], включая участки выведения на орбиту и возвращения спускаемого аппарата (СА) на Землю. Включение НА в состав КА и ее взаимодействие с его служебными системами требует обеспечения выполнения условий функциональной и структурной автономности НА, которые обусловлены особенностями проведения КЭ. Автономность НА определяется характером и степенью ее интеграции с бортовыми системами и с конструкцией КА, а именно, реализацией соответствующих интерфейсов: механического, электрического, информационноуправляющего и т.п., что связано в первую очередь со структурной автономностью НА. Функциональная автономность НА определяется расходами ресурсов бортовых систем КА, которые необходимы для обеспечения ее нормального функционирования. Поэтому оценить степень функционально-структурной автономности НА можно как количеством затрачиваемых на ее функционирование ресурсов бортовых систем КА, так и характером функциональных взаимосвязей НА и КА. В связи с этим одной из наиболее сложных задач в части оптимизации степени функционально-структурной автономности, решаемых при проектировании КА и при разработке НА, является обеспечение требуемого теплового состояния конструкции КА и устанавливаемой в него НА [4]. Результаты эскизного проектирования НА СИГМА-2 для КА «Бион-М» № 2 [3] также показали, что в силу предъявленных требований к этой НА и особенностей планируемых для нее КЭ задача управления тепловым состоянием аппаратуры в течение всего полета КА является актуальной из-за необходимости использования бортового электропитания.

В состав НА СИГМА-2 входят отдельные блоки, объединенные линиями электропитания и передачи команд управления и измерительной информации. Каждый блок предназначен для проведения отдельных групп КЭ [3], которые требуют различных температурных режимов контейнеров с биообъектами. В свою очередь в блоках НА имеются секции, в которых эти режимы могут существенно различаться. В настоящем сообщении рассматривается расчетная схема для формирования модели управления тепловым состоянием одного из блоков НА СИГМА-2, состоящего из двух секций. В первой секции этого блока НА располагается модуль термостабилизированных контейнеров с биообъектами, а во второй секции — емкость с запасом ростовой среды, а также емкость для сброса отработанной ростовой средой. Ростовая среда предназначена для проведения КЭ МУЛЬТИИНКУБАТОР (постановщики КЭ — Самарский государственный медицинский университет и медицинский центр «Династия» (Самара) [3]). Кроме того, в этом же блоке НА предполагается проведение КЭ ТРАНСКРИПТОМ-МСК (постановщик КЭ — ИМБП РАН [3]). Температура элементов конструкции в первой секции блока НА должна быть равна $T_1^* = 310K$, что соответствует требо-

[©] Редакция журнала «ОПиПМ», 2019 г.

ваниям проводимых КЭ, а во второй секции для емкости с запасом ростовой среды $-T_2^* = 280...285K$, что необходимо для обеспечения сохранности как запасов, так и отработанной среды в течение полета КА (до 35 суток). Внутри спускаемого аппарата KA температура газовой среды (воздуха) равна $T_{\rm CA}$ и при этом выполняются условия нормального функционирования НА: $T_2^* < T_{CA} < T_1^*$. В условиях космического полета естественная конвекция отсутствует, поэтому теплообмен между газовой средой, элементами конструкции и стенками камер секций должен обеспечиваться за счет вынужденной конвекции, осуществляемой посредством вентиляции внутри камер каждой из секций блока НА. Кроме того, внутри камер секций блока НА между его элементами конструкции также имеет место лучистый теплообмен [4]. Регулирование тепловых потоков внутри секций осуществляется с помощью элементов Пельтье и омических нагревателей суть исполнительных органов системы терморегулирования рассматриваемого блока НА. Основная особенность моделирования теплового состояния НА связана с тем, что она является системой с распределенными параметрами, состояние которой описывается системами дифференциальных уравнений в частных производных [5, 6]. Поэтому здесь рассматривается подход к построению конечномерной модели системы терморегулирования блока НА, которая основана на доступной измерительной информации — текущих температурах элементов конструкции и газовых сред. Она формируется исходя из оценок текущих балансов тепловых потоков между функциональными и вспомогательными элементами конструкции внутри каждой секции блока, с одной стороны, и, с другой стороны, между блоком НА и элементами конструкции внутреннего объема СА. При этом для описания теплового состояния стенок необходимо применить дискретизацию уравнения теплопроводности [5] (вводя в рассмотрение согласно методу сеток температуры сечений по толщине стенок [7]). Получаемая таким образом модель теплового состояния НА отличается тем, что она будет содержать в правых частях не только линейные по температурам члены, обусловленные теплообменом между элементами конструкции и газовыми средами в камерах секций (согласно закону Ньютона-Рихмана [5, 6]), но и нелинейные члены, которые описывают процессы лучистого теплообмена (согласно законам Стефана-Больцмана, Кирхгофа и др. [4, 6]). Переменные состояния — T_k , $k = 1, 2, 3, \ldots$, в полученной модели можно нор-мировать так: $\tau_k = (T_k - T_0^*)/T_0^*$, где $T_0^* = (T_1^* + T_2^*)/2$. Тогда с учетом значений T_1^* и T_2^* в разложении множителей $(1 + \tau_k)^4 = 1 + 4\tau_k + \cdots$ степени выше первой можно отбросить, так как $4\tau_k \leqslant 0,05$. То есть полученная модель будет линейной по нормированным переменным состояния, но при этом будет содержать квадратичные члены относительно управляющих параметров суть токов в элементах Пельтье и омических нагревателях блока НА. Последнее потребует модификации процедуры определения управляемости, но исключает релейные оптимальные управления такой системой. Кроме того, в значительной степени облегчается процедура идентификации экспериментальным путем параметров системы терморегулирования НА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сычев В. Н., Ильин Е. А., Ярманова Е. Н. и др. Проект «Бион-М1»: общая характеристика проекта. — В кн. Космический научный проект «Бион-М1»: медикобиологические эксперименты и исследования./ Под ред. А. И. Григорьева. М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2016, с. 58–69.
- Курганская Л. В. Космический эксперимент с научной аппаратурой «МРТ» на КА «Фотон-М» № 4. — Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия, 2014, № 10 (121), с. 140–152.
- Горелов Ю. Н., Курганская Л. В., Щербак А. В. Научная аппаратура КАРБОН, МРТ и СИГМА для проведения космических экспериментов на борту космических аппаратов «Бион-М» № 1 и «Фотон-М» № 4. — Известия СамНЦ РАН, 2016, т. 18, № 4(6), с. 1039–1047.

- 4. Андреянов В. В., Черенков В. Б. Атманов И. Т. и др. Автоматические планетные станции./ Отв. ред. Ю. К. Ходарев; АН СССР. Ин-т косм. исследований. М.: Наука, 1973, 280 с.
- 5. *Араманович И.Г., Левин В.И.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1969, 288 с.
- 6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977, 344 с.
- Крылов В. И., Бобков В. В. Монастырный П. И. Вычислительные методы. Т. II. М.: Наука, 1977, 400 с.