

АКТУАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА «АИСТ» ПО ДАННЫМ ТЕЛЕМЕТРИИ, ПОЛУЧЕННЫМ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ НКУ-СГАУ

С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, И.В. Кауров, М.Д. Коровин,
М.А. Иванушкин, С.С. Волгин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В статье рассматривается процесс экспериментальной отработки системы обеспечения теплового режима космического аппарата «АИСТ» на основе данных компьютерного моделирования орбитального полета аппарата в программе «TERM». Предложены уточненные значения параметров наземной отработки системы обеспечения теплового режима малых космических аппаратов типа «АИСТ» по данным телеметрии, полученным с помощью наземного комплекса управления НКУ-СГАУ. Выполнен расчет температур панелей аппарата в системе «ANSYS» для начальных условий, использовавшихся при термовакуумных испытаниях и для скорректированной величины теплового потока на аппарат.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, космический аппарат, САЕ система, система обеспечения теплового режима, тепловой поток.

Введение

При экспериментальной отработке системы обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата (КА) всегда очень остро встает вопрос сложности реализации подобных испытаний. Приходится решать целый ряд задач, связанных с защитой материальной части от переохлаждения и перегрева одновременно. Задача усложняется и тем, что КА совершает неориентированный полет и какая грань будет подвергаться наибольшему термическому воздействию неизвестно.

Изучение работоспособности и эффективности СОТР проводилось на малых КА «АИСТ» (RS-43as) и «АИСТ» (RS-41at), которые являются совместной разработкой Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета) и АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» (г. Самара). МКА «АИСТ» (RS-43as) запущен 19 апреля 2013 г. с космодрома Байконур в качестве попутного груза КА «Бион-М» №1. МКА «АИСТ» (RS-41at) запущен с помощью ракеты-носителя «Союз-2.1в» 28 декабря 2013 г. с космодрома Плесецк.

Сравнение результатов наземной отработки с данными, полученными в ходе полета космических аппаратов, позволяют оценить правильность проведенных испытаний и осуществить необходимые доработки для большего приближения к реальным условиям при последующих подобных испытаниях, а следовательно создавать КА с большим ресурсом существования в работоспособном состоянии.

Технические характеристики орбит, на которых функционируют аппараты, приведены в табл. 1. [1]

Табл. 1 Орбитальные характеристики МКА «АИСТ»

	«АИСТ» (RS-43as)	«АИСТ» (RS-41at)
Перигей, км	569.8	595.1
Апогей, км	583.0	621.6
Наклоне- ние, град.	64.9	82.4
Период об- ращения, мин.	96	97
Главная полуось, км	6947	6986
Масса, кг	39	39

1. Задачи исследования

Наземные испытания

Испытания проводились на экспериментальной установке ТВУ400-05 экспериментальной базы АО РКЦ «Прогресс» в 2012 году.

СОТР предназначена для поддержания на МКА требуемого теплового режима, необходимого для нормального функционирования бортовой аппаратуры при орбитальном полете. СОТР состоит из системы терморегулирования (СТР) и пассивных средств терморегулирования. Пассивными средствами являются тепловые трубы, терморегулирующие покрытия, термические сопротивления. Термовакuumные испытания проводились для крайних условий штатной эксплуатации МКА по величинам внешних тепловых потоков и внутренних тепловыделений бортовой аппаратуры, в режимах «Перегрев» и «Переохлаждение». Погрешность воспроизведения величин имитируемых тепловых потоков составила $\pm 10\%$. Испытания проводились при давлении не более $1 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Тепловые воздействия космического пространства имитировались экранами, имеющими степень черноты ≥ 0.9 и охлаждаемые в процессе испытаний жидким азотом до температуры минус $180 (\pm 10) ^\circ\text{C}$. В связи с тем, что, по полученным данным телеметрии, аппараты практически всегда находятся в перегретом состоянии, исследование проводилось для одного из режимов «Перегрев». Обеспечивались максимальные внешние тепловые потоки. Длительность витка – 90 минут, тень – отсутствует. Плоскость панели «- X» направлена на Землю (рисунок 1).

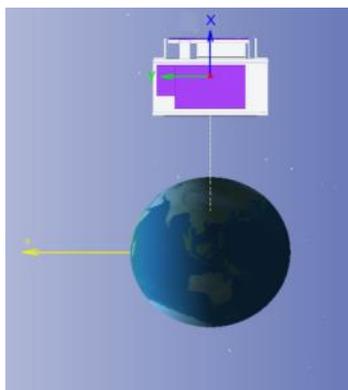


Рис.1. Положение МКА в режиме "Перегрев"

Центр приема

Наземный комплекс управления (НКУ) осуществляет прием телеметрии с момента запуска обоих КА. НКУ обеспечивает решение задач управления полётом МКА с использованием наземных средств. Режим работы МКА – автономный с применением принципов оперативного управления в зонах радиовидимости. Программа автономного функционирования формируется средствами комплекса управления (рисунок 2).

На 20.03.2016 г. летный экземпляр МКА «АИСТ» (RS-43as) совершил 15129 витков вокруг Земли, проведено 7256 сеансов связи, МКА «АИСТ» (RS-41at) совершил 11768 витков, проведено 4897 сеансов связи. Длительность сеанса связи (СС) - Min-32с, Max-620с, файл телеметрической информации содержит 1440 измерений (1 измерение в минуту) 126 параметров.

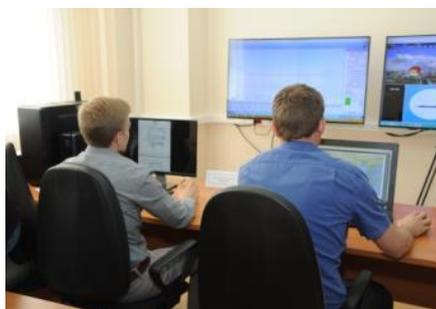


Рис.2. Центр приема НКУ-СГАУ

Методика проведения испытаний

На основании сравнения имеющихся данных о проведении термовакуумных испытаний и данных телеметрии, полученных с помощью НКУ-СГАУ, можно сделать вывод о наличии расхождения между прогнозируемой и наблюдаемой температурой на борту аппарата. Выявленное расхождение вероятно обусловлено неточностями в моделировании полетных условий. В частности величины тепловых потоков.

В первую очередь допущения касались установки ТВУ400-05, которая, для создания теплового потока, имеет в своем составе только имитаторы инфракрасного излучения, воспроизводящие результирующее воздействие внешних тепловых потоков. Для проведения приближенных испытаний к условиям космического пространства необходима весьма

дорогая установка и достаточно много времени, поэтому закупать дорогое оборудование нецелесообразно. Установку ТВУ400-05 необходимо оснастить отдельными имитаторами источников солнечного излучения (ИСИ) и имитаторами источников земного излучения (ИЗИ). При проведении термовакуумных испытаний величины внешних тепловых потоков, воздействующих на поверхность были рассчитаны в пакете «TERM». В связи с этим, целесообразным является проверка и корректировка вводных данных в программном обеспечении для достижения реальных показаний. [2]

Для оценки величины тепловых потоков необходимых для нагрева аппарата до наблюдаемых значений было произведено моделирование в программном комплексе «ANSYS». Полученные значения сравнивались с результатами, полученными при моделировании полета в программе «TERM».

Задачей работы является актуализация значений проектных переменных при моделировании условий эксплуатации космического аппарата на орбите.

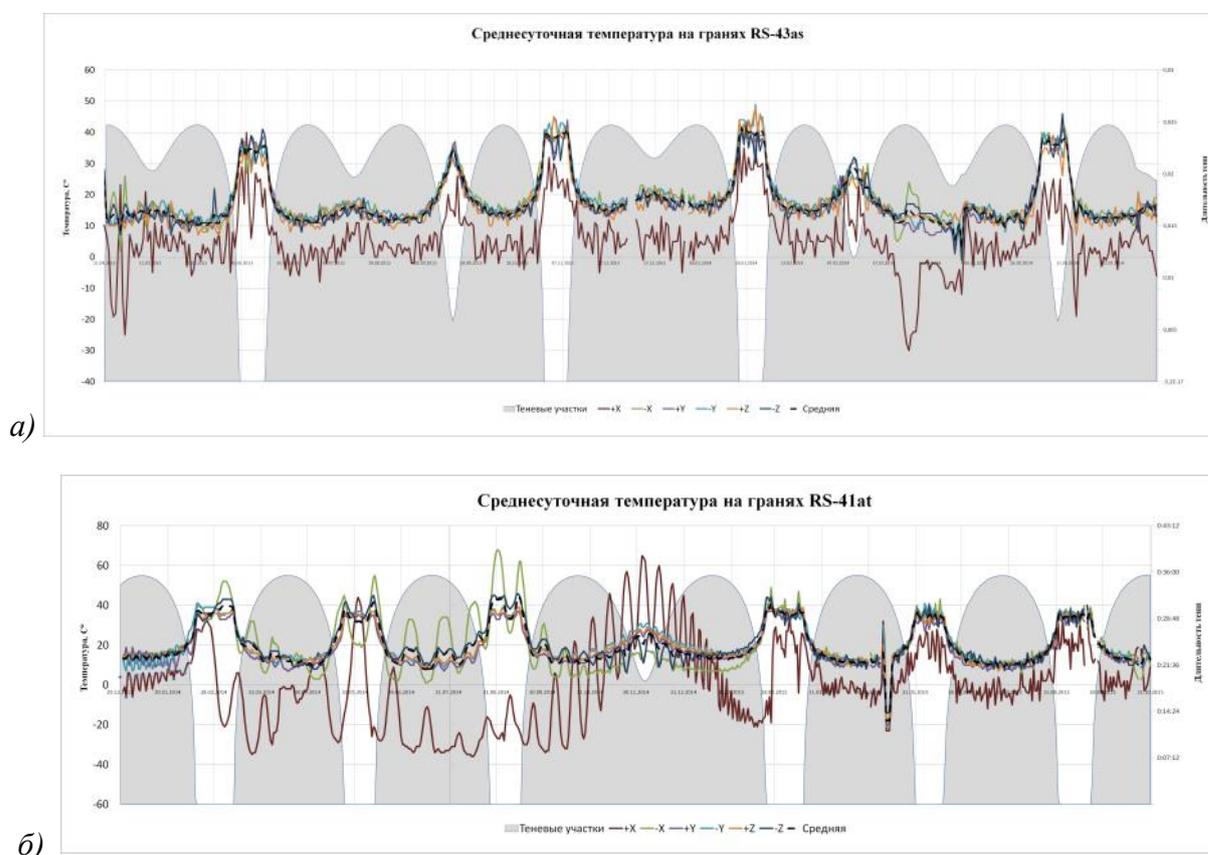


Рис.3. Графики среднесуточной температуры на гранях аппаратов: а- «АИСТ» (RS-43as); б - «АИСТ» (RS-41at)

2. Характеристики моделей

Модель аппарата в «TERM»

Для расчета температур элементов конструкций использовался метод тепловых балансов (называемый также методом сосредоточенных параметров, методом изотермических узлов или зон) (рисунок 4).

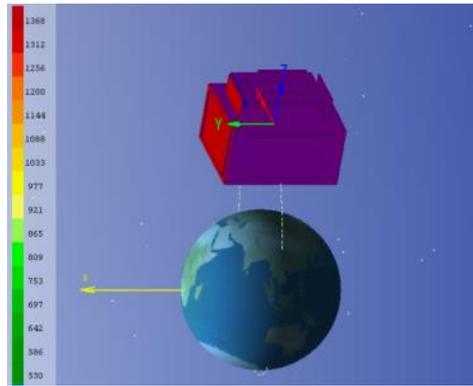


Рис.4. Величина тепловых потоков, воздействующих на МКА «Аист» и полученных в программе «TERM»

При использовании этого метода конструкция разбивается на L изотермических узлов. Для поверхностей задаются коэффициент поглощения солнечного излучения - A_s , степень черноты - ϵ , термическое сопротивление - R и падающие потоки. Между поверхностями рассчитываются лучистые связи (угловые коэффициенты). Для каждого узла составляется уравнение теплового баланса. В результате получается следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$m_i c_i \frac{dT_i}{d\tau} = Q_{ki} + Q_{ni} + Q_{ri} + Q_{vi} + Q_{ai} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$T_i(0) = T_i^0, \quad 1 \leq i \leq L \quad (2)$$

где

m_i, c_i - масса и теплоемкость узла i , соответственно,

T_i - температура узла i , К,

τ - время, с,

Q_{ki} - кондуктивный тепловой поток к узлу i , Вт,

Q_{ni} - нелинейный тепловой поток к узлу i , Вт,

Q_{ri} - результирующий лучистый тепловой поток к узлу i , Вт,

Q_{vi} - внутренних тепловыделений в узле i , Вт,

Q_{ai} - атмосферный тепловой поток, к узлу i , Вт.

В результате решения системы уравнений находятся температуры всех расчетных узлов. Увеличивая число узлов можно получить температурное поле по конструкции с требуемой степенью детализации.

Значения величин тепловых потоков и температуры панелей, вычисленные в программе «TERM», близки к тем, по которым проводились термовакуумные испытания, однако,

они расходятся с результатами анализа телеметрии, что дает основания полагать что величина тепловых потоков при испытаниях была занижена.

Модель аппарата в «ANSYS»

Целью теплового расчета является математическое моделирование тепловых потоков, воздействующих на МКА АИСТ в режиме ПЕРЕГРЕВ. Внешними источниками тепла являются Солнце и Земля. Внутренними источниками тепла являются блоки МАГКОМ и КУНС.

При расчете работы МКА в режиме ПЕРЕГРЕВ было принято начальное значение температуры 40°C как осредненная температура аппарата, полученная на основе данных телеметрии [3].

Расчет был проведен с учетом следующих начальных условий:

- МКА находится на орбите с наклоном 90°;
- начальная температура всех элементов конструкции равна 40°C;
- МКА находится в режиме ПЕРЕГРЕВ в течении 24 часов;
- тепловой поток в режиме ПЕРЕГРЕВ постоянный по величине.
- Варьируемой переменной при расчете была величина суммарного теплового потока на МКА.

Для расчета в программном пакете «ANSYS» была построена упрощенная трехмерная модель МКА. Результат расчета температуры поверхностей МКА при величине тепловых потоков, соответствующих полученным в программе «TERM» близок к результатам наземных испытаний КА (рисунок 5), однако отличается от эксплуатационных температур аппарата, полученных из телеметрических данных.

При повышении величины удельного теплового потока на панель +Y с 1400 Вт/м² до 2275 Вт/м² расчетные значения температур поверхностей аппарата приблизились к эксплуатационным (рисунок 6), что позволяет предположить, что при испытаниях величина теплового потока на МКА в режиме ПЕРЕГРЕВ была занижена по сравнению с реальной.

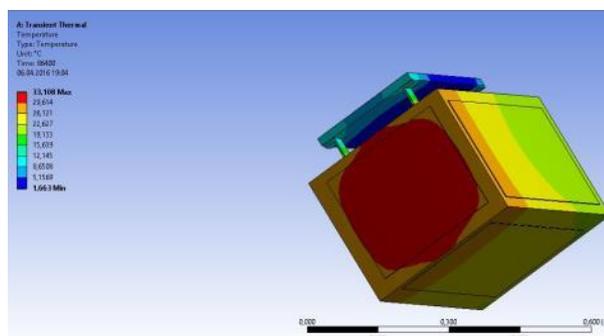


Рис.5. Температурные значения аппарата в программе «ANSYS», при воздействии заданных тепловых потоков

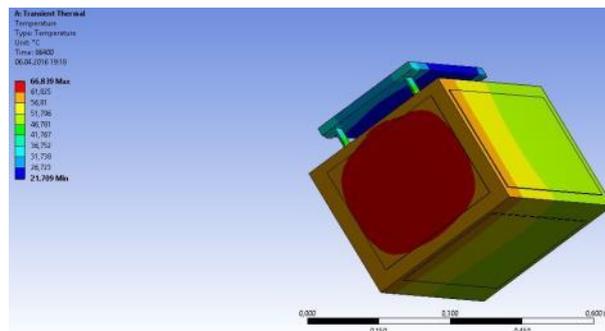


Рис.6. Температурные значения аппарата в программе «ANSYS», при воздействии актуализированных тепловых потоков

Выводы

Проведенный анализ параметров наземной отработки системы обеспечения теплового режима малых космических аппаратов типа «АИСТ» по данным телеметрии, полученным с помощью наземного комплекса управления НКУ-СГАУ позволяет сделать вывод о необходимости уточнения начальных условий, в частности величин тепловых потоков. На основании приведенного математического моделирования выполненного в программных пакетах «TERM» и «ANSYS» предложено скорректированное значение величины теплового потока на аппарат в режиме «Перегрев».

Литература

1. Сёмкин Н.Д. Электризация поверхности малого низкоорбитального космического аппарата «Аист»/ Н.Д. Сёмкин, В.В. Брагин, А.В. Пияков, А.М. Телегин, Д.М. Рязанов, М. Г. Матвиец. – Самара: Вестник СГАУ, том 15, N 1, 2015 – 46 с.
2. Куликов Д.С. Автоматизированное формирование конструктивных элементов тепловой модели космического аппарата / Д.С. Куликов, А.А. Шатин, И.Г. Вельмисов. – Самара: Вестник СГАУ, том 41, N 3, 2013 – 139 с..
3. Tkachenko S. I. “AIST” small satellites’ family, a joint project between RSC “Progress” and SSAU, thermocontrol system performance analysis / S.I. Tkachenko, V.V. Salmin, I.S. Tkachenko, S.L. Safronov, I. V. Kaurov, M.A. Ivanushkin, S.S. Volgin, M. D. Korovin – 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 1-4 Dec. 2015.