

УДК 621:3+536:24+519.682

А. М. Кислов, В. Г. Романенко, В. Н. Фенченко

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

## ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ НА ВИТКЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ. НОВАЯ ВЕРСИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ TRASSA

---

*Розроблено нову версію пакету програм TRASSA для розрахунку орбітальних теплових режимів КА. Новий пакет дає можливість враховувати програмні зміни орієнтації КА і керовані повороти та/або зміщення окремих компонентів супутника протягом орбітального витка. Поліпшено інтерфейс побудови базової геометричної моделі КА. Наведено приклад розв'язання зовнішньої задачі радіаційного теплообміну КА змінної орієнтації та конфігурації.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] описан пакет программ TRASSA для компьютерного моделирования и расчета теплового режима космических аппаратов с фиксированной конфигурацией (без подвижных элементов) и с какой-то одной из представленных в пакете пространственной ориентацией.

В то же время многие спутники для решения различных целевых задач изменяют на витке свою ориентацию, то есть совершают программные повороты корпуса, а научные приборы и отдельные элементы (панели солнечных батарей, антенны и др.) совершают управляемые повороты и смещения относительно корпуса аппарата [<http://www.arkos.kharkov.ua/sutkm.php>]. Например, космический аппарат «Січ-2» для дистанционного зондирования Земли имеет на витке два базовых режима ориентации — «на Солнце» (основной) и «на Землю» в районе съемки [3].

После программных поворотов аппарата, управляемых поворотов и смещений его элементов изменяются геометрическая конфигурация КА, его ориентация относительно Солнца и Земли, взаимное положение элементов относительно друг друга. Вследствие этого изменяются пото-

ки излучения от Солнца и Земли, падающие на элементы конструкции аппарата, то есть изменяются условия внешнего и внутреннего лучистого теплообмена, что приводит к изменению температурного режима элементов и приборов спутника.

Для моделирования тепловых режимов космических аппаратов с учетом изменения их ориентации и геометрической конфигурации на витке предназначена новая версия пакета программ TRASSA2. Пакет разработан в среде Delphi 7 на языке Object Pascal для работы на компьютерах с Windows-98, 2000, XP, NT.

### СОСТАВ И ЗАДАЧИ ПАКЕТА ПРОГРАММ

Пакет программ TRASSA2 включает англоязычные программные системы OASIS2 и ANTRES2 (главные меню приведены в табл. 1, 2). Каждая программа имеет сервисный инструментарий и справочную систему с «Руководством пользователя» и сборником контрольно-тестовых задач. Программы тестированы на различных задачах, для которых решения получены аналитически или другими численными методами.

Все исходные данные для программ вводятся в диалоговом режиме в соответствующие окна. Выполняется автоматический контроль значений параметров на полноту, допустимость и

Таблица 1. Главное меню программы OASIS2

Меню	Раздел	Описание команд и режимов
Ogm-file		Работа с бинарными <i>ogm</i> -файлами — базами данных ОГМ
	New	Создать новый <i>ogm</i> -файл
	Open	Открыть существующий <i>ogm</i> -файл
	Save as...	Сделать копию текущего <i>ogm</i> -файла
Building		Построение ОГМ КА
	Construct	Сборка базовой ОГМ из типовых примитивов
	Common view	Трёхмерная графическая визуализация ГМ
	Cross section	Графическая визуализация поперечных сечений ГМ
	Transform	Преобразование текущей ГМ путем вращений и/или сдвигов ее подсистем (блоков, компонентов)
	Merge	Объединение двух <i>ogm</i> -файлов в один <i>ogm</i> -файл
	Configure	Построение базы конфигураций ОГМ — бинарного <i>cnf</i> -файла
	Configuration view	3-мерная графическая визуализация конфигураций ГМ
	Facets amount	Справка о числе элементарных граней в текущем <i>ogm</i> -файле
	<i>Ogm-file</i> ToText	Создать текстовый <i>tgm</i> -файл для бинарных записей <i>ogm</i> -файла
	<i>Cnf-file</i> ToText	Создать текстовый <i>tcf</i> -файл для бинарных записей <i>cnf</i> -файла
Orb		КА в условиях орбитального полета
	Orbit conds	Формирование текстового <i>drr</i> -файла: <i>Орбитальные условия КА</i>
	Cosmic view	Графическая 3-мерная визуализация данных <i>drr</i> -файла
	Calculation	Решение внешней и внутренней лучистых задач КА
Non-orb	—	Расчет лучистого теплообмена КА в термовакuumной камере
Result		Визуализация результатов
	Plots	Построение графиков распределения поглощенных гранями КА внешних потоков на расчетном периоде
	Tables	Формирование таблиц внешних лучистых потоков на грани КА
	Facets areas	Формирование таблицы площадей граней
	Exchange factor	Просмотр РУК между гранью-эмиттером и гранями-приемниками в заданной конфигурации ОГМ
Edit	—	Встроенный текстовый редактор для просмотра, редактирования и копирования текстовых входных и выходных файлов
Tools		Инструментарий: сервисные файлы и процедуры
	Primitives album	Альбом используемых типовых примитивов в <i>bmp</i> -рисунках
	CartesianToSpherical	Пересчет декартовых координат в сферические координаты
	EulerAnglToSpherical	Пересчет углов Эйлера в сферические координаты базисных ортов <i>i, j</i> повернутой СК относительно ее исходного положения
	SphericalToEulerAngl	Пересчет сферических координат базисных ортов <i>i, j</i> повернутой СК относительно ее исходного положения в углы Эйлера
	Continued fraction	Расчет подходящих цепных дробей для выбора числа расчетных витков орбиты — периодичности внешнего облучения КА
	Date of Sun-Locus	Расчет календарной даты по положению Солнца
	Sun-synchronous orb	Расчет наклона солнечно-синхронной орбиты по высоте перигея и наоборот
	Time-Locus	Пересчет истинной аномалии КА в текущее время и доли орбитального периода
Help		Вызов справок
	User Manual	«Руководство пользователя» программы OASIS2
	Tests suite	Сборник контрольно-тестовых задач

совместимость с выдачей сообщений при обнаружении ошибок. В зависимости от постановки задачи программы могут работать автономно или в составе пакета.

В новой версии пакета улучшен пользовательский интерфейс программ, в частности за счет введения контекстных окон, которые предоставляют возможность извлекать необходимые параметры в предпроцессорном и послепроцессорном режимах работы.

**Программная система OASIS2** предназначена для построения оптико-геометрических моделей и решения задач внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА в орбитальных условиях. В расширенном изложении OASIS2 выполняет такие основные функции.

1. Построение в выбранной пользовательской системе координат *базовой* оптико-геометрической модели (ОГМ) космического аппарата в виде бинарного *ogm*-файла из набора типовых фигур-*примитивов*, записанных в базе данных OASIS2. В новой версии может выполняться также сборка ОГМ путем объединения предварительно построенных отдельных блоков (*ogm*-файлов). Здесь мы используем термин *примитив* — англоязычный вариант конструктива [1], который представляет собой систему конечных элементов базовых типов поверхностей: плоскости, сферы, эллипсоида, круговых цилиндра и конуса со своими оптическими характеристиками в солнечном спектре и в тепловом ИК-диапазоне (собственное излучение Земли и элементов КА).

Таблица 2. Главное меню программы ANTRES2

Меню	Раздел	Описание команд и режимов
Dtr-file	—	Открыть текстовый файл данных для расчета теплового режима и выполнить контролируемый ввод
Edit	—	Открыть файл и загрузить его в встроенный текстовый редактор
Absorbed flow	—	Просмотр графиков распределения поглощенных внешних потоков на расчетном периоде в вершинах графа расчетных элементов (ГРЭ)
Calculation	—	Расчет теплового режима
Result		Визуализация результатов
	Plots of nodes temperature	Построение графиков температуры для вершин ГРЭ
	Table of nodes temperature	Формирование таблицы температур для вершин ГРЭ
	Thermostatic switches	Формирование таблицы состояний температурных ключей: вентилятора, нагревателей и жалюзи
	Plots of arcs temperature	Построение графиков распределения температуры в одномерном элементе (дуге ГРЭ) для заданных моментов времени
	Tables of arcs temperature	Формирование таблиц температуры для дуг ГРЭ
	Heat balance of node	Просмотр составляющих теплового баланса для вершины ГРЭ
	Heat balance of arc	Просмотр составляющих теплового баланса дуги ГРЭ
Tools		Сервисные программы
	Calculator	Программа записи и расчета выражений
	Cubic spline	Редактирование табличной функции для интерполяции кубическим сплайном
	Honeycomb	Расчет эффективных коэффициентов теплопроводности для ортотропного слоя сотового заполнителя
	Two-layer structure	Расчет эффективного коэффициента продольной теплопроводности бипластины
Help		Вызов справок
	User Manual	«Руководство пользователя» программы ANTRES2
	Tests suite	Сборник контрольно-тестовых задач

2. Изображение трехмерной геометрической модели КА и ее фрагментов в выбранном ракурсе. Предусмотрена возможность изображения сечений модели и невидимых линий, маркировка рабочих сторон граней, масштабирование выделенной окрестности на рисунке.

3. Создание переменной геометрии КА (при наличии подвижных компонентов) — базы данных по *виртуальным конфигурациям* КА на расчетном орбитальном витке в формате бинарного *cnf*-файла. Каждая запись *cnf*-файла определяет преобразование базовой конфигурации в виртуальную для заданного момента времени или положения на витке. Под виртуальной конфигурацией подразумевается ОГМ, явно не задаваемая в виде *ogm*-файла, но воспроизводимая по мере надобности в соответствующих режимах.

4. Воспроизведение в режиме трехмерной графической визуализации виртуальных конфигураций КА. Возможен просмотр изображения конфигураций или их фрагментов в различных ракурсах (*any side*), со стороны (*Sun*) или против Солнца (*anti-Sun*), в направлении зенита (*zenith*) или надира (*nadir*).

5. Моделирование орбитального движения КА и вычисление данных, необходимых для расчета потоков излучения от Земли и Солнца. Вычисляются: текущие параметры орбиты с учетом вековых возмущений от второй зональной гармоники геопотенциала; положение КА на витке и его ориентация в заданной последовательности программных поворотов; орты направлений на Солнце и центр Земли в пользовательской системе координат.

6. Трехмерное изображение в выбранном ракурсе взаимного положения Земли, КА и его орбиты, Солнца на эклиптике в геоэкваatorialной системе координат.

7. Решение методом Монте-Карло задач внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА на витке.

Моделирование поступательного и вращательного движения элементов КА предусмотрено в программах ESARAD [<http://www.techcentreuk.alstom.com>] и NEVADA [<http://www.tac1.com/product.html>]. В программе RadCad [<http://www.crtech.com/radcad.html>] пакета Thermal Desktop

моделируется смещение и поворот отдельных элементов и группы элементов КА на витке.

*Программная система ANTRES2* предназначена для расчета температурных полей в элементах КА и реализует методику расчета теплового режима [1], обобщенную на переменную геометрию КА с учетом его программных поворотов. Программа ANTRES2 при работе в пакетном режиме использует результаты решения задач лучистого теплообмена, полученные OASIS2 в виде последовательности бинарных файлов, соответствующих заданным на витке зонам различной ориентации КА и его виртуальным геометрическим конфигурациям.

#### ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КА НА ВИТКЕ

При построении оптико-геометрических моделей КА (ОГМ) используется связанная с КА прямоугольная декартова пользовательская система координат (ПСК), которая выбирается из соображений простоты и удобства построения ОГМ.

Переменные геометрические модели КА являются вариациями первоначально выбранной *базовой* ОГМ, которая строится в пункте меню «Building» в режиме команды «Construct» (см. табл. 1). Базовая ОГМ может быть также собрана из предварительно построенных блоков. Исходные установки подвижных блоков в базовой ОГМ задаются так, чтобы определение их ориентации на различных участках витка было как можно проще.

Пусть построена некоторая базовая ОГМ, данные о которой записаны в бинарный файл *Task#0.ogm*, где *Task* — назначенное имя задачи, а суффикс *#0* идентифицирует ОГМ как базовую модель. Записи, состав которых приведен в [1], содержат информацию о типовых примитивах ОГМ, включая данные об установке примитива в ПСК: точку привязки и сферические координаты осей абсцисс и ординат локальной СК примитива. Список примитивов, из которых построена базовая ОГМ, описывается интервалом  $1 \dots N_s$ .

Предполагается, что в ОГМ КА имеется  $N_{tb}$  подвижных блоков. Каждый блок характеризуется списком-выборкой примитивов из интер-

вала  $1 \dots N_s$  и собственной СК  $X_{ib}, Y_{ib}, Z_{ib}$ , ассоциированной с локальной СК одного из примитивов в этой выборке. В заданные моменты времени  $t_m$ , отсчитываемые от перигея ( $m = 1, 2, \dots, M; t_1 = 0, t_M < P$ , где  $P$  — орбитальный период), каждый блок поворачивается вокруг неподвижной относительно ПСК точки на заданные углы поворота вокруг заданных направленных осей вращения или поступательно перемещается на заданные сдвиги вдоль осей ПСК (подробнее см. в разделе *Пример расчета*).

Построение переменной ОГМ КА, аналогичное построению базовой ОГМ, реализуется в режиме команды «Configure» путем создания базы данных для виртуальных конфигураций КА на расчетном витке орбиты в виде бинарного файла записей Task#0.cnf. Запись для виртуальной конфигурации включает следующие параметры:

- количество подвижных блоков  $N_{ib} < 10$ ;
- момент автоматического обновления конфигурации на витке. Этот момент может быть задан истинной аномалией или временем в минутах. Если задана истинная аномалия, то текущее время вычисляется автоматически, и наоборот;
- координаты точки вращения ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) или сдвиги ( $dX, dY, dZ$ ) и список примитивов, образующих подвижный блок;
- направляющие косинусы  $c_1, c_2, c_3$  оси вращения и угол  $p$  поворота блока вокруг этой оси. Для каждого блока предусмотрено три оси поворота. Если осей поворота меньше трех, то «лишние» оси задаются произвольно с углом поворота, равным нулю. Сдвиг блока реализуется, если все три угла поворота равны нулю.

Для заданного угла поворота  $p$  и направляющих косинусов  $c_1, c_2, c_3$  положительной оси вращения, так что  $p > 0$  соответствует вращению правого винта в направлении положительной оси, матрица вращения определяется выражением [2]

$$\mathbf{A} \equiv [a_{ij}] = \cos p \cdot \mathbf{I} + (1 - \cos p) \cdot \begin{pmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{pmatrix} + \sin p \cdot \begin{pmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица;  $i, j = 1, 2, 3$ .

При построении виртуальных конфигураций часто требуется повернуть какой-либо блок осью  $Z_{ib}$  в заданном направлении, например по вектору Солнца или вектору центра Земли, что связано с весьма громоздкими вычислениями направляющих косинусов оси вращения и угла поворота. Для таких случаев в программе предусмотрена процедура предварительного вычисления параметров поворота (команда «Pre-count»).

Предположим, что в ПСК задан некоторый направляющий вектор  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$  и заданы сферические угловые координаты  $L_{Xib}, P_{Xib}$  и  $L_{Yib}, P_{Yib}$  осей  $X_{ib}, Y_{ib}$  СК блока в базовой ОГМ. Нужно вычислить направление оси  $\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3)$  и угол  $p$ , такие, чтобы после поворота блока вокруг этой оси на угол  $p$  ось  $Z_{ib}$  имела направление вектора  $\mathbf{a}$ . Алгоритм вычисления параметров поворота выглядит следующим образом.

Вычисляется матрица  $\mathbf{R}(L_{Xib}, P_{Xib}, L_{Yib}, P_{Yib})$ , преобразующая сферические координаты осей блока в направляющие косинусы этих осей в прямоугольной декартовой ПСК. Для вектора  $\mathbf{a}$  определяются долготный  $L_a$  и полярный  $P_a$  углы.

Вычисляются матрицы вращения  $\mathbf{A}_2(P_a)$  и  $\mathbf{A}_3(L_a)$  вокруг осей  $Y$  и  $Z$  ПСК соответственно на угол  $P_a$  и  $L_a$ .

Находится результирующая матрица  $\mathbf{A}$ , поворачивающая блок так, что ось  $Z_{ib}$  СК блока принимает направление вектора  $\mathbf{a}$ :  $\mathbf{A} = [a_{ij}] = \mathbf{A}_3(L_a) \times \mathbf{A}_2(P_a) \times \mathbf{R}$ ;  $i, j = 1, 2, 3$ .

Определяются угол поворота  $p$  и направляющие косинусы  $c_1, c_2, c_3$  положительной оси вращения [2]

$$p = \arccos\left(\frac{1}{2}(a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1)\right),$$

$$c_1 = \frac{a_{32} - a_{23}}{2 \sin p}, \quad c_2 = \frac{a_{13} - a_{31}}{2 \sin p}, \quad c_3 = \frac{a_{21} - a_{12}}{2 \sin p}, \quad (2)$$

угол  $p > 0$  соответствует вращению правого винта, вворачиваемого в направлении положительной оси вращения.

Воспроизведение взаимного положения блоков ОГМ в заданных точках витка выполняется в режиме команд «Configuration view» и «Orb|Calculation». При этом используется база конфигураций (файл Task#0.cnf) и копия файла

Task#0.ogm базовой конфигурации, который и преобразуется в файл виртуальной конфигурации.

Рассмотрим вращение блока в  $m$ -й записи файла конфигураций, который описывается некоторой выборкой примитивов  $(n_1, \dots, n_{N_p})$ , относительно заданной точки  $W(X_o, Y_o, Z_o)$  последовательно вокруг осей, направленных по векторам  $\mathbf{c}_j = (c_{1j}, c_{2j}, c_{3j})$ , на углы  $p_j, j=1, 2, 3$ .

Выполняется параллельный перенос СК блока как твердого тела из точки  $W$  в начало ПСК (пересчитываются точки привязки всех  $N_p$  примитивов рассматриваемого блока).

В соответствии с (1) выполняем три последовательных поворота, которые описываются углами  $p_j$  и осями вращения с направляющими векторами  $\mathbf{c}_j$ , и получаем результирующую матрицу вращения блока вокруг начала ПСК. При этом пересчитываются точки привязки и сферические координаты осей абсцисс и ординат всех примитивов выборки  $(n_1, \dots, n_{N_p})$ .

Выполняется обратный параллельный перенос блока, повернутого вокруг начала ПСК, в исходную точку вращения  $W(X_o, Y_o, Z_o)$ .

Если число поворотных блоков  $N_{ib} > 1$ , то организуется цикл от 1 до  $N_{ib}$ . Кроме того, организуется внешний цикл по конфигурациям: в режиме «Calculation» от 1 до  $M$ , а в режиме «Configuration view» — для выбранной выборки из интервала 1 ...  $M$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА КА

Моделирование внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА реализуется программой OASIS2 по вычислительной схеме [1], обобщенной на переменные ориентацию и геометрию КА на витке. Орбитальные условия КА (параметры орбиты, ориентация КА на различных участках витка для базовой конфигурации) задаются в разделе меню «Orb|Orbit conds».

Изменение ориентации корпуса КА на витке характеризуется матрицей ориентации из девяти

ти колонок и  $N$  строк, где  $N$  — число зон постоянной ориентации КА на витке. Состав строки представлен одномерной табл. 3.

В табл. 3 номер зоны принимает значение в интервале 1 ...  $N$ ; bSA (базовая система координат БСК) задается своим номером: 1 — экваториальная, 2 — перигейная, 3 — орбитальная, 4 — эллиптическая СК; компоненты  $L_{X_s}, P_{X_s}, L_{Y_s}, P_{Y_s}$  — это установочные долготный и полярный углы оси абсцисс  $X_s$  и оси ординат  $Y_s$  системы координат КА в БСК; в зоне постоянной ориентации предусмотрено вращение КА вокруг одной из координатных осей ПСК ( $X_u, Y_u, Z_u$ ) с заданной угловой скоростью  $W$ ; момент изменения ориентации КА отсчитывается от момента прохождения перигея. Строки упорядочены по временному параметру  $t_{reor}$ .

Матрица ориентации используется для расчета векторов направления на центр Земли и на Солнце в ПСК. В частном случае  $N = 1$  процедура расчета этих векторов описана в работе [1]. В обобщенном варианте при  $N > 1$ , как и в случае  $N = 1$ , организуется цикл от 1 до  $N_c$ , где  $N_c$  — число заданных расчетных положений КА на витке. Расчет векторов выполняется сначала по данным 1-й строки матрицы ориентации, затем, после достижения момента изменения ориентации, — по данным 2-й строки и т. д. до завершения цикла.

Переменная геометрическая модель КА на витке представляется последовательностью  $M$  виртуальных конфигураций. Общее решение задачи лучистого теплообмена определяется комбинацией решения частных задач, полученных для отдельных конфигураций в соответствующих зонах витка.

Решения частных задач вычисляются в режиме «Orb|Calculation» последовательно для всех заданных конфигураций  $m = 1, 2, \dots, M$ . При этом программа выполняет декомпозицию заданной конфигурации ОГМ на расчетные элементарные грани, из которых состоят примитивы. Инфор-

Таблица 3. Строка матрицы ориентации

Zone Зона	bSA БСК	$L_{X_s}$	$P_{X_s}$	$L_{Y_s}$	$P_{Y_s}$	Axis Ось вращения	$W$ , град/с Угловая скорость	Turn moment, min Момент изменения ориентации $t_{reor}$
--------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------------------	----------------------------------	--

мация о гранях формируется в виде автономных записей, описывающих грань в ПСК. Запись для грани включает тип базовой несущей поверхности, данные о положении и ориентации в ПСК, термооптические характеристики рабочей стороны и параметры, задающие ее границы. Эти данные в виде упорядоченных внутренних структур используются при решении задачи лучистого переноса в системе расчетных граней виртуальной конфигурации. При декомпозиции автоматически создается файл с таблицей соответствия упорядоченных номеров граней в ПСК структурным номерам граней примитивов. Этот файл используется в режиме команды меню «Result» программы OASIS2, а также при формировании файла исходных данных Task#0.dtg для программы ANTRES2.

После декомпозиции выполняется совместное решение внутренней и внешней радиационных задач: 1) расчет разрешающих угловых коэффициентов между гранями ОГМ; 2) вычисление лучистых потоков от Земли и Солнца, поглощенных гранями ОГМ в расчетных точках орбитального витка.

Для решения задач лучистого теплообмена используется метод Монте-Карло. Результаты решения лучистой задачи в виде бинарных файлов Task#m.gtg ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) являются входными данными программы ANTRES2 при расчете температурного режима КА.

### ПРИМЕР РАСЧЕТА

В новой версии пакета основные изменения содержатся в программе OASIS2. Приведен иллюстративный пример расчета с использованием этой программы.

**Постановка задачи.** Рассматривается микроспутник, состоящий из корпуса в форме параллелепипеда  $75 \times 75 \times 95$  см, двух панелей СБ  $65 \times 80$  см и входного отверстия прибора с подвижной крышкой на нижней грани корпуса (рис. 1). Панели установлены на фланцах с шарнирами и могут поворачиваться вокруг трех осей. Боковые стенки корпуса, основания корпуса и фланцы, рабочие и тыльные стороны панелей имеют соответственно термооптические характеристики:  $\varepsilon = 0.9, 0.92$  и  $0.92, 0.88$  и  $0.8$ ;  $\alpha_s = 0.9, 0.95$  и  $0.95, 0.72$  и  $0.7$ .

Орбита круговая солнечно-синхронная высотой 758 км, период обращения 100 мин. Для расчетного витка долгота восходящего узла  $\Omega = 9.5$  ч и аргумент перигея  $\omega = 50^\circ$  (выход из тени) на дату весеннего равноденствия. Солнечная постоянная  $1380$  Вт/м<sup>2</sup>, тепловая эмиссия Земли  $230$  Вт/м<sup>2</sup>, альbedo Земли  $0.3$ .

В течение 40 мин при истинной аномалии  $0 \leq \theta < 144^\circ$  (на освещенном участке витка) корпус КА ориентирован в базовой орбитальной СК: ось  $+Z$  направлена в зенит, ось  $+X$  образует угол  $60^\circ$  с плоскостью орбиты со стороны ее северного полюса. Панели СБ все время устанавливаются нормально к вектору Солнца, крышка прибора открыта.

На втором участке витка ориентация КА солнечная: ось  $+Z$  направлена на Солнце, ось  $+X$  перпендикулярна к плоскости эклиптики и направлена в ее южный полюс; панели СБ параллельны основанию корпуса, прибор закрыт крышкой.

Задача состоит в вычислении временной зависимости потоков излучения, поглощенных поверхностями КА в течение орбитального витка.

**Решение задачи** с использованием программы OASIS2 (табл. 1).

1. Назначается имя задачи: MicroSat#0. В режиме команды «Building|Construct» формируется [1] из набора примитивов («Tools|Primitives album») базовая ОГМ КА (панели СБ параллельны основаниям корпуса, прибор открыт) и сохраняется в бинарном файле MicroSat#0.omg. Базовая конфигурация КА и соответствующий ей список примитивов приведены на рис. 1.

2. В режиме команды «Orb|Orbit conds» посредством диалогового окна «Database of orbital conditions» задаются параметры, необходимые для решения задачи внешнего лучистого теплообмена КА. Число расчетных положений КА на витке («Number of loci on orbit revolution») принято равным  $N_c = 100$ , число зон фиксированной ориентации  $N = 2$  («Number of Zones of SC stable orientation»), ориентация КА в 1-й зоне в течение 40 мин орбитальная ( $bSA = 3$ ), во 2-й зоне — солнечная ( $bSA = 4$ ). Заданные параметры сохраняются в текстовом файле MicroSat#0.dtg. С использованием этих данных по команде

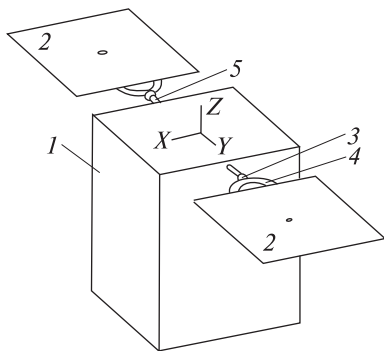


Рис. 1. Базовая конфигурации и окно списка примитивов геометрической модели КА: 1 – корпус, 2 – панели СБ (рабочие стороны отмечены маркерами), 3 – шарнир, 4 – фланец, 5 – выдвижной шток; прибор 6 и крышка прибора 7 не показаны; XYZ – ПСК (бортовая)

Name of primitive (constructive unit)	№	Type
Корпус: параллелепипед 75*75*95 см	1	52
Шток-1 выдвижной (-Y)	2	30
Шарнир-1 (-Y)	3	20
Фланец СБ-1 (-Y)	4	10
Панель-1 СБ (рабочая сторона) -Y	5	4
Панель-1 СБ (тыльная сторона) -Y	6	0
Шток-2 выдвижной (+Y)	7	30
Шарнир-2 (-X)	8	20
Фланец СБ-2 (+Y)	9	10
Панель-2 СБ (рабочая сторона) +Y	10	4
Панель-2 СБ (тыльная сторона) +Y	11	0
Прибор	12	30
Крышка прибора	13	10

Records: 13

Buttons: Clear, Choose

Mark the start of interval of items.

Рис. 2. Окна управления базой конфигураций (а) и ввода параметров конфигураций (б)

No.	Time, min	True anomaly, deg
1	0	0
2	5	18
3	10	36
4	15	54
5	20	72
6	25	90
7	30	108
8	35	126
9	40	144

Buttons: Close, Add, Delete, Edit, Copy

Records: 9

а

Number of turned and/or shifted blocks: 2	Turn moment in orbit: <input checked="" type="radio"/> True anomaly, deg. 0			
	<input type="radio"/> Time in minutes 0			
Block	List of block primitives	Xo (dX)	Yo (dY)	Zo (dZ)
1	3.6	0	-0.545	-0.03
Axis	cosA	cosB	cosG	Angle, deg.
1.1	0.154359	0.983333	-0.096068	117.067
1.2	1	0	0	0
1.3	0	0	1	0
Turn of block by axis Ztb to given direction				
Spherical coordinates of axes Xtb, Ytb defining Initial Setting of turning block			Pointing vector in system of User Axes	
L_Xtb	p_Xtb	L_Ytb	p_Ytb	0.854057 -0.274905 -0.441604
0	90	90	90	
Pre-count				

б

«Pre-count» вычисляются в ПСК направления на центр Земли и на Солнце в расчетных точках витка (текстовый файл MicroSat#0.loc).

3. Правильность сформированных данных контролируется в режиме команды «Cosmic view» посредством 3-мерного графического изображения и справочной информации нему. Справоч-

ная информация содержит данные о положении Солнца на эклиптике, параметрах орбиты и некоторых дополнительных характеристиках: угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце (beta-angle), время пребывания КА в тени Земли, истинные аномалии начала и конца теневого участка и др.



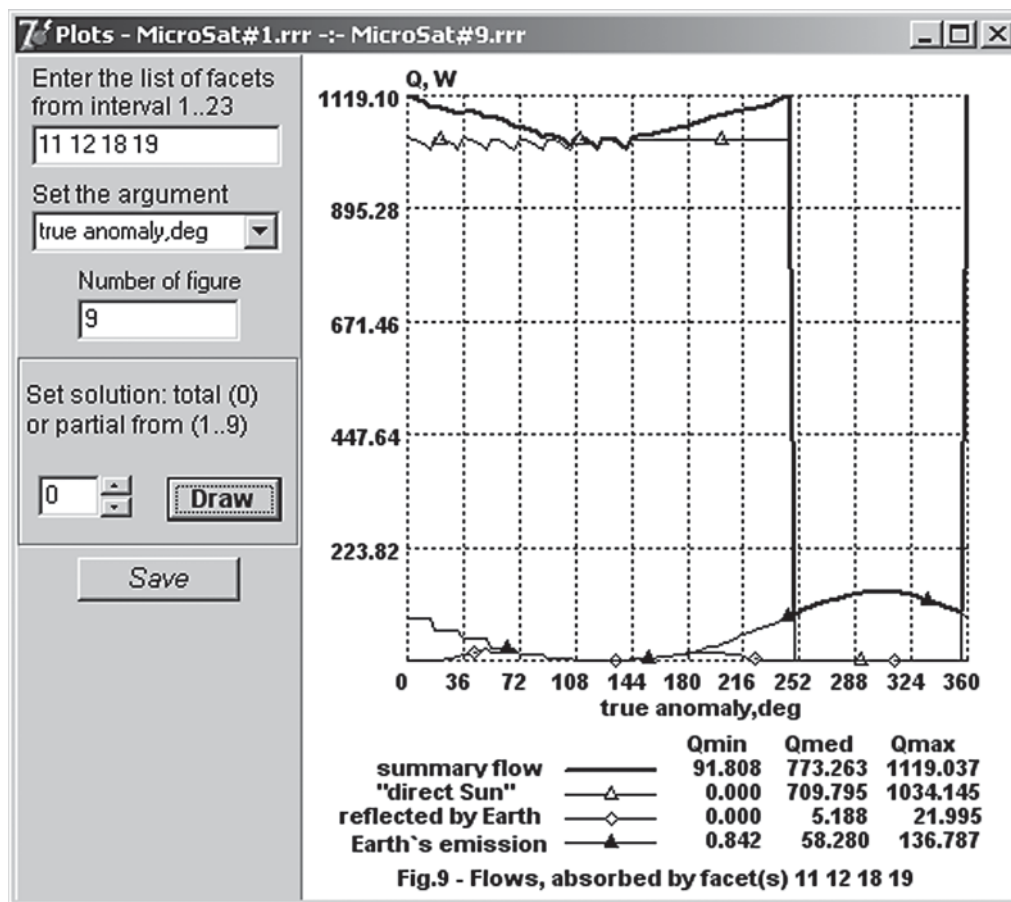


Рис. 3. Окно изображения результатов с графиками поглощенных лучистых потоков рабочими сторонами панелей СБ

4. В режиме «Building|Configure» создается база виртуальных конфигураций в виде бинарного файла MicroSat#0.cnf для описания поворотов СБ и крышки прибора относительно корпуса КА в течение витка. Принимается, что управляемые повороты СБ в 1-й зоне витка выполняются не в каждой расчетной точке, а периодически с шагом  $\Delta\theta = 18^\circ$ . При этом геометрическая модель КА имеет восемь конфигураций в 1-й зоне витка и одну — во 2-й зоне.

База конфигураций КА создается в окне «Configurations database» (рис. 2, а) аналогично построению базовой конфигурации в режиме «Building|Construct». Параметры записи для конфигураций ОГМ вводятся в окне «Editor of configuration» (рис. 2, б). В окне на рис. 2, б записа-

ны параметры поворота блока примитивов 3 ... 6 (панель — 1 СБ) для построения конфигурации #1 в интервале истинной аномалии  $0 \leq \theta < 18^\circ$ .

Записи последующих из восьми конфигураций в 1-й зоне витка отличаются только направлением оси и углом поворота панелей СБ в зависимости от направления вектора Солнца. Конфигурация #9 (2-я зона витка) образуется из базовой ОГМ поворотом крышки вокруг направления оси +X на угол  $180^\circ$  в положение «прибор закрыт».

5. Построение виртуальных конфигураций ОГМ проверяется в режиме 3-мерной графической визуализации «Configuration view». Графическая визуализация реализуется в рабочем окне «Configurations of OGM».

6. В поле «Configuration» окна «Database of orbital conditions» последовательно устанавливаются номера  $m$  конфигураций ( $m = 1, 2, \dots, 9$ ) и для них в режиме «Calculation» решаются частные задачи лучистого теплообмена КА. В результате девяти постановок формируется последовательность выходных файлов MicroSat#1.rgr, ..., MicroSat#9.rgr.

7. Результаты решения задачи лучистого теплообмена КА в виде графиков и таблиц для выбранных граней ОГМ формируются в режиме команды «Result|Plots» в окне «Plots» изображаются в виде графиков общее и частные решения задачи лучистого теплообмена.

На рис. 3 приведено общее решение радиационной задачи для панелей СБ. Пилообразный характер графика для поглощенного потока от Солнца в зоне орбитальной ориентации КА ( $0 \leq \theta < 144^\circ$ ) обусловлен принятым шагом коррекции ориентации панелей  $\Delta\theta = 18^\circ$ . На освещенном участке 2-й зоны витка ( $144^\circ \leq \theta < 248^\circ$ ) при солнечной ориентации КА этот поток имеет постоянное значение. Погрешность значений пилообразного потока относительно постоянного составляет 2 %.

1. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н. Пакет программ TRASSA для расчета тепловых режимов космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 4. — С. 3—16.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1970. — 720 с.
3. Лизунов Г. В., Глемба В. И., Корепанов В. Е. и др. Космический эксперимент «Потенциал» на борту спутника «Січ-2» // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 3—8.

Надійшла до редакції 01.10.11

A. M. Kislov, V. G. Romanenko, V. N. Fenchenko

THE THERMAL ANALYSIS  
OF SPACECRAFTS WITH ORIENTATION  
AND GEOMETRIC CONFIGURATION  
VARYING DURING AN ORBIT REVOLUTION.  
A NEW VERSION OF THE SOFTWARE TRASSA

A new version of the software TRASSA for the calculation of thermal modes of a spacecraft is developed. The new package enables us to take into account the changes in the spacecraft orientation and controlled turns and/or displacements of separate components of a spacecraft during an orbital revolution. The construction interface for the basic geometric model of a spacecraft is improved. An example of the solution of external radiation problem for a spacecraft with variable orientation and configuration is given.