Моделирование конструкции космических аппаратов

Structural modelling of spacecrafts

Горшков / Gorshkov L.
Лев Капитонович
(maneb@mail.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
профессор кафедры механики
г. Санкт-Петербург

Мосин / Mosin D.
Дмитрий Александрович
(mosin-da@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник кафедры космических аппаратов и средств
межорбитальной транспортировки.
г. Санкт-Петербург

Тютюкин / Tyutyukin A.
Александр Евгеньевич
(alex.tyutyukin@list.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Уртминцев / Urtmintsev I.
Игорь Александрович
(urt_eg@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры космических аппаратов и средств
межорбитальной транспортировки.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – spacecraft; математическая модель – mathematical model; облик конструкции космического аппарата – spacecraft construction, геометрические характеристики – geometrical characteristics.

Разработан подход к формализации процесса построения моделей КА, его модулей и систем на основе выявления конструктивных и логических связей между элементами структуры.
Представлены расчётные модели разбиения некоторых поверхностей на элементы одинаковой площади, позволяющие сформировать облик элементов конструкции КА на основе их геометрических характеристик.
Анализ модели позволяет выполнить обоснование рациональной структуры перспективного КА.

The process of creation of models of S, its modules and systems based on identification of constructive and logical communications between elements of structure is developed. Design models of splitting some surfaces into the elements of the identical area allowing creating an appearance of elements of a design of S based on their geometrical characteristics are provided. Justification of rational structure of perspective S allows making the analysis of model.

Общая характеристика процесса моделирования

Всесторонняя разработка конструкции космических аппаратов (КА) требует применения универсальных программных комплексов типа ANSIS, Solid Works, а также специализированных программных пакетов. Решение же частных вопросов применения КА целесообразно выполнять на упрощенных моделях, отражающих наиболее важные специфические черты изучаемых процессов.

Функционирование КА на рабочих орбитах протекает в условиях воздействия многообразных факторов естественной природы: солнечное излучение, тепловое излучение Земли, радиационные пояса, потоки микро- и макрочастиц, а также различных объектов техногенного происхождения. Основными элементами конструкции КА, потенциально подверженными влиянию таких факторов, являются солнечные батареи (СБ) и элементы теплообмена бортовой аппаратуры: радиаторы, холодильники-излучатели (ХИ), а также герметичные отсеки корпусных конструкций.

Оценивание воздействия на объекты космической техники в полете факторов внешних воздействий (ФВВ) различной природы требует разработки программ моделирования как облика КА, так и полета КА по реальным траекториям с учетом реального времени и ориентации в пространстве. Для решения этих проблем предпринята разработка программно-моделирующего комплекса (ПМК), способного выполнять следующие задачи:

1) конструирование упрощенных моделей реальных КА, отражающих их наиболее характерные признаки – облик, геометрию, конструктивные особенности внешних элементов, потенциально подверженных воздействию;

2) разработку модели энергосистемы КА как самостоятельного замкнутого объекта, выполняющего

задачи поддержания целенаправленного процесса функционирования;

3) разработку типовых моделей функционирования КА в различных условиях с учетом ориентации как аппарата в целом, так и его целевых и обеспечивающих систем.

Данный ПМК содержит комплекс вычислительных программ и процедур визуализации расчетных схем и моделей.

Разработка геометро-физической модели КА

Современные КА представляют собой панельно-ферменные конструкции, иногда достаточно сложной пространственной конфигурации. Основу разработки и построения пространственного образа КА составляет его математическая модель, содержащая конструктивное описание [1, 2].

Математическая модель (ММ) КА – комплекс $C_{\text{КА}}$ – есть объединение самостоятельных в конструктивном отношении модулей, представленных в виде предопределенных структур – S_m, геометрически привязанных к центру масс (ЦМ) КА. В состав ММ также следует включить программы функционирования КА – P_k. С ЦМ совмещена строительная (связанная) система координат комплекса (СКК). Выбор ориентации осей СКК определяется конструктивными и функциональными особенностями КА. Таким образом,

$$C_{\text{КА}} = \bigcup_{m=1}^{M} S_m + \sum_{k=1}^{K} P_k \,, \tag{1}$$

где M – количество модулей в составе КА;

K – количество базовых программ функционирования КА по целевому назначению.

В качестве основных модулей, определяющих структуру КА, следует назвать:

– модуль (модули) целевой аппаратуры (МЦА);

– энергетический модуль (ЭМ), включающий солнечные батареи (СБ), аккумуляторную батарею (АБ), систему электропитания (СЭП), систему терморегулирования (СТР);

– двигательный модуль (ДМ), содержащий двигательные установки управления пространственным перемещением КА и движением вокруг его ЦМ.

Каждый модуль имеет базовую точку начала отсчета, совпадающую с его центром масс, геометрическим центром или иной точкой, мотивированной какими-либо соображениями. В точку начала отсчета помещается система координат модуля (СКМ), в которой выполняется упорядоченное описание его структуры в виде набора I компонентов A_i, учитываемых в рамках решения поставленной задачи. Математическая модель модуля в общем виде может быть представлена следующей формулой

$$S_m = \bigcup_{i=1}^{I} A_i + M_m \,, \tag{2}$$

где M_m – матрица ориентации модуля.

При введении в состав КА модуль соответствующим образом ориентируется в пространстве относительно ЦМ КА, и в результате его система координат – СКМ – может быть смещена и повернута относительно ССК комплекса. Таким образом, обязательным и важным элементом структуры являются матрица ориентации модуля, хранящая параметры угловых направлений СКМ в ССК, и вектор трансляционных координат центра модуля в ССК. Для удобства хранения ориентационных параметров вводится четырехмерный массив ориентации модуля

$$M_m = Mt_m + R_m = \left\| \begin{array}{ccc|c} ca_{00} & ca_{01} & ca_{02} & X \\ ca_{10} & ca_{11} & ca_{12} & Y \\ ca_{20} & ca_{21} & ca_{22} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| ,$$

где коэффициенты ca_{ik} матрицы Mt_m – направляющие косинусы осей СКМ с осями СКК, а вектор $R_m\{X,Y,Z\}$ определяет пространственное положение модуля в ССК.

Одним из важных компонентов является корпус модуля, ограничивающий его объем. Корпус может быть определён совокупностью относительно тонкостенных поверхностей различной, как правило простой, формы: плоскими панелями, элементами цилиндрических и сферических поверхностей. В системе координат модуля выполняется разбиение поверхности на элементы простой формы – треугольники и прямоугольники – расчет координат их вершин, геометрических центров и площадей. Ориентация элемента разбиения определяется нормалью к нему, компоненты которой также рассчитываются в СКМ. При необходимости каждому элементу поверхности сопоставляется толщина и необходимый набор усреднённых теплофизических характеристик материала и наружного покрытия (плотность ρ, теплоемкость c, теплопроводность λ, коэффициенты поглощения a_S, отражения r и теплового излучения ε и др.). Иногда нет необходимости сопоставлять теплофизические характеристики материалов каждому элементу разбиения; в этом случае группа параметров описывает весь модуль в целом. Таким образом, структура компонента A_i также представляет собой объединение составных частей различной природы – фрагментов

$$A_i = \bigcup_{j=1}^{J} \left[\bigcup_{n=1}^{N} \left(\sum_{S,K} F_{sk} + \bigcup_{L} f_l \right)_n \right]_j \,, \tag{3}$$

где J – количество фрагментов в структуре описания модуля, включающих упорядоченную совокупность N элементов разбиения поверхности фрагмента на SxK ячеек и сопоставляемый каждому элементу набор L теплофизических параметров f_l: ρ, c, λ, a_S, r, ε и т.п.

В соответствии со сказанным выше структурный параметр F_{sk}, характеризующий ячейку разбиения

поверхности, включает вектор положения её центра в СКМ – r_{sk}, вектор нормали n_{sk} и площадь поверхности S_{sk}.

Таким образом, предложенная схема структурирования модели КА выполняется по схеме [3], рис. 1

В качестве примера рассмотрим построение в декартовой СК *X, Y, Z* модели плоской панели P_n с центром на оси *Z* и сторонами *W* и *H*, параллельными осям *X* и *Y*, соответственно. Панель ориентирована вдоль оси *Z* и расположена параллельно плоскости *XY* на расстоянии z_0 от нее. Панель разбивается на N_WxN_H прямоугольных элементов. Тогда положение *ik*-го элемента панели в принятой СК можно определить вектором

$$r_{ik}(x,y,z):\quad x_i = -\frac{W}{2} + (i - \frac{1}{2})\cdot\frac{W}{N_W};$$

$$y_i = -\frac{H}{2} + (k - \frac{1}{2})\cdot\frac{H}{N_H};\quad z = z_0.$$

Отсчёт индексов по оси *X* выполняется слева-направо, а по оси *Y* сверху-вниз.

Вектор нормали к элементу поверхности, а для плоской панели – ко всей панели, имеет компоненты $n_{ik}\{0,0,1\}$. Площадь элемента поверхности $s_{ik}=WH/(N_W x N_H)$. При необходимости может быть задана толщина панели *d*, которая включается в набор структурно-геометрических параметров.

Теперь «формулу» панели можно определить в виде структуры (по терминологии языка С) или записи (по терминологии языка Pascal/Delphi) [4,5]:

$$P_n:\begin{bmatrix} P_n^{str}:\bigcup_{i=1,k=1}^{N_w,N_h} r_{ik}\ \&\ \bigcup_{i=1,k=1}^{N_w,N_h} n_{ik}\ \&\ \bigcup_{i=1,k=1}^{N_w,N_h} s_{ik}\ \&\ d \\ P_n^{PH}:f(\rho,c,\lambda,a_S,r,\varepsilon,...) \\ P_n^{Ornt}=\begin{vmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{vmatrix}\ \&\ P_n^{Pos}=\begin{vmatrix}0\\0\\z_0\end{vmatrix}\end{bmatrix}, \quad (4)$$

где символ & указывает на принадлежность к компоненту структуры.

Первая строка записи представляет совокупность структурно-геометрических параметров, вторая – набор необходимых физических характеристик поверхности, а третья – ориентационно-позиционную матрицу центра масс объекта.

В случае, если панель двухсторонняя, например солнечная батарея, то следует дублировать первую и вторую строки, наделив их собственными характеристиками. При этом вектора нормалей необходимо инвертировать.

В конструкции КА панель должна занимать вполне определенное положение. Например, начало её координат следует поместить в точку $C\{X_C, Y_C, Z_C\}$ относительно ЦМ КА и повернуть вокруг собственной оси *Z* на угол γ. В этом случае следует сначала выполнить операцию поворота, а затем трансляции. Ориентационно-позиционная матрица примет вид

$$P_n^{Ornt}=\begin{vmatrix}\cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{vmatrix};\quad P_n^{Pos}=\begin{vmatrix}X_C\\Y_C\\Z_C+z_0\end{vmatrix}.$$

Теперь для приведения элементов разбиения панели в СК КА следует вектор положения центра каждого элемента r_{ik} умножить на матрицу ориентации P_n^{Ornt} и прибавить соответствующие компоненты позиционного вектора P_n^{Pos}. Вектора нормалей n_{ik} следует только повернуть, умножив на матрицу P_n^{Ornt}.

Разбиение поверхности оболочек на элементы

Характеризовать каждый элемент разбиения поверхности полным набором геометро-физических параметров не всегда рационально. Сопоставлять каждому элементу собственную нормаль и площадь, а тем более физические характеристики, следует только при необходимости. Например, при разбиении плоской поверхности целесообразно определить одну

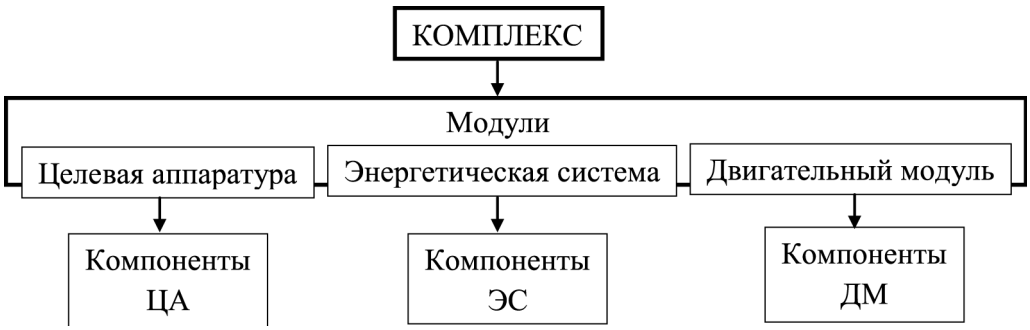

Рис. 1. Структура комплекса КА

нормаль, а для цилиндрической поверхности задать нормали для элементов разбиения одного кольцевого пояса. Более того, целесообразно выполнять разбиение поверхности на элементы одинаковой площади. Это позволяет заметно сократить объем хранимой информации, а зачастую и упростить алгоритмы применения. Наиболее просто разбиения на элементы одинаковой площади выполнить для прямоугольных панелей и сферических поверхностей. В последнем случае кольцевые пояса одинаковой площади образуются сечением поверхности плоскостями, перпендикулярными оси симметрии и отстоящими на одинаковую величину друг от друга.

Более сложным является разбиение трапеции, конической поверхности или кольца на элементы одинаковой площади. В качестве примера рассмотрим разбиение поверхности трапеции на элементы одинаковой площади, рис. 2. Основная задача –разбить поверхность на участки одинаковой площади, параллельные основаниям фигуры.

Площадь горизонтальной полоски при разбиении по высоте на N_h частей

$$S_1 = \frac{W_b + W_t}{2} \cdot \frac{H}{N_h}.$$

В общем случае выполняется равенство

$$\frac{W_b + W}{2} \cdot h = K \cdot \frac{W_b + W_t}{2} \cdot \frac{H}{N_h}, \qquad (5)$$

где K – количество элементов от W_b до W; для рисунка K=1.

Имеет место следующее соотношение

$$W = W_b - \Delta \cdot \frac{h}{H}, \qquad (6)$$

где $\Delta = W_b - W_t$.

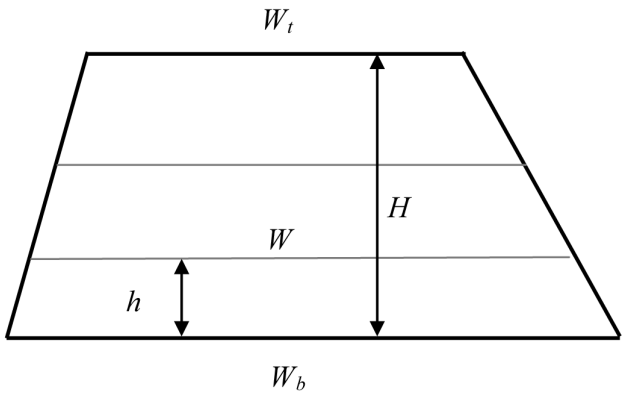

Рис. 2. Трапеция

Подставляя (6) в (5), после преобразований получим следующее квадратное уравнение относительно h

$$2 \cdot W_b \cdot h - \frac{\Delta}{H} \cdot h^2 = \frac{K}{N_h} \cdot (W_b + W_t) \cdot H;$$

$$h^2 - 2 \cdot H \cdot \frac{W_b}{\Delta} \cdot h + \frac{K}{N_h} \cdot (W_b + W_t) \cdot H^2 = 0. \qquad (7)$$

Разрешая это уравнение относительно h, получим

$$h = H \cdot \frac{W_b}{\Delta} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{K}{N_h} \cdot \left(1 - \frac{W_t^2}{W_b^2}\right)}\right]. \qquad (8)$$

Соответственно, ширина W над K полосками равна

$$W = W_b \cdot \sqrt{1 - \frac{K}{N_h} \cdot \left(1 - \frac{W_t^2}{W_b^2}\right)}. \qquad (9)$$

Разделив верхнее и нижнее основание трапеции на равное количество частей N_w и соединив точки одинакового номера, получим разбиение поверхности на $N_h \cdot N_w$ элементов равной площади

$$S_{nj} = \frac{W_b + W_t}{2} \cdot \frac{H}{N_h \cdot N_w}. \qquad (10)$$

Формула разбиения поверхности конуса на кольцевые пояса одинаковой площади, аналогичная (9), имеет вид

$$h = \frac{R_b}{\mathrm{tg}\gamma} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{K}{N_h} \cdot \left(1 - \frac{R_t^2}{R_b^2}\right)}\right]. \qquad (11)$$

где R_t, R_b – радиусы верхнего и нижнего днищ конуса;
γ – полуугол при вершине конуса.

Такая же формула для разбиения поверхности диска на кольцевые пояса одинаковой площади такова

$$R_K = R_O \cdot \sqrt{1 - \frac{K}{N_r} \cdot \left(1 - \frac{R_I^2}{R_O^2}\right)}, \qquad (12)$$

где R_I, R_O –внутренний и наружный радиусы диска;
R_K – наружный радиус K-го кольца;
N_r – количество разбиений по радиусу кольца.

Модель КА с оптико-электронной системой наблюдения космического пространства

Изложенные выше принципы и подходы к моделированию КА были реализованы в специализированном программном комплексе (ПК) «Орбита». ПК предназначен для моделирования тепловых процессов в космических объектах сложной структуры при их

полёте по орбитам и при маневрировании в процессе выполнения целевых задач. В качестве примера работы ПК рассматривается процесс разработки модели КА – космического телескопа, общий вид которого в разрезе показан на рисунке 3. В состав КА входят три основных модуля:

– телескоп;

– солнечная батарея;

– агрегатный отсек, содержащий элементы энергодвигательной системы.

Главная форма ПК «Орбита» представлена на рис. 4.

Левая панель формы содержит элементы управления построением структурных элементов объекта в последовательности компоненты → модули → Комплекс. В качестве шаблонов элементов конструкции принят некоторый базовый набор основных компонентов (цилиндр, панель, сфера и др.) и дополнительных компонентов (штанга, шарниры, антенны различных типов и др). Различие между ними заключается в том, что основные компоненты структурируются на отдельные элементы посредством разбиения поверхности, в то время как дополнительные компоненты такому разбиению не подвергаются.

Допускается объединения модулей в составе Пакета модулей на этапе построения элементов конструкции, тиражирование компонентов и модулей, а также их сохранение в файлах на любой стадии разработки и вызов из файлов. В процессе разработки может быть выполнена коррекция каких-либо компонентов или их полная переработка. Позиционирование компонентов в составе модулей и модулей в составе Комплекса контролируется с помощью позиционной матрицы модели и OpenGL-модельно-видовой матрицы. В правой части формы находится панель разработки конструкции КА, начиная от создания отдельных компонентов и кончая полной сборкой Комплекса.

Внизу средней части формы находится панель с кнопками управления перемещениями и поворотами элементов конструкции и модулей по панели разработки. Применение специализированной панели позволяет выполнить точное позиционирование компонентов в модуле, а модулей в Комплексе.

В соответствии с изложенной выше формальной моделью построения конструкции КА каждый основной компонент конструкции подвергается разбиению на структурные элементы с их привязкой к геометрическому центру компонент; на этой основе формируются его элементная, позиционная и ориентационная матрицы, описываемые формульным комплексом (3). Разбиение поверхностей всех основных компонентов выполняется на отдельные элементы равной площади в пределах компонента согласно схемам разбиения, рассмотренным выше (9), (11), (12).

Формульная формализация структурных компонентов комплекса оказывается полезной при сборке компонентов в модули, а модулей в Комплекс. Обусловлено это тем, что в конечном счете все структурные элементы конструкции должны быть привязаны к центу масс Комплекса и отслеживать его эволюцию в процессе полёта по орбите и при выполнении целевых задач. Формализация позволяет построить универсальный (в пределах конкретного Комплекса) аппарат пересчёта ориентационных характеристик элементов конструкции и элементов разбиения поверхностей при вариациях ориентации самого Комплекса.

Общий вид трёх модулей КА: телескопа, агре-

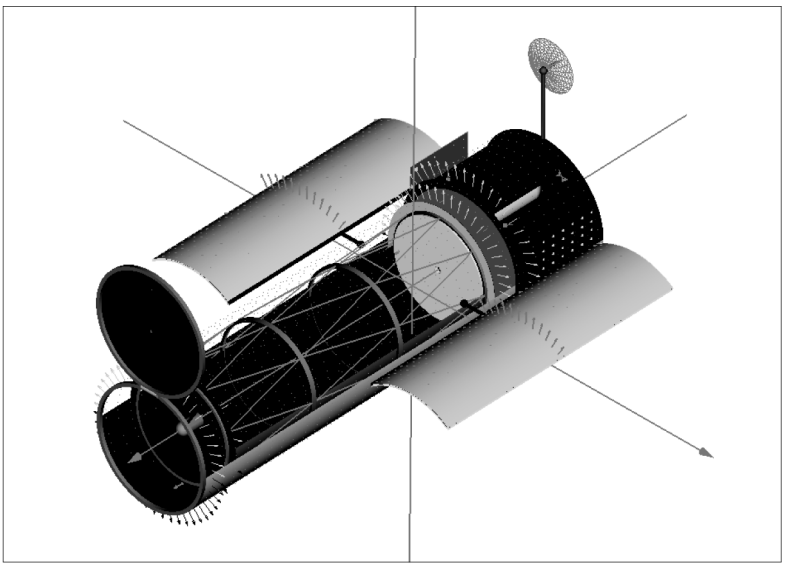

Рис. 3. Общий вид модели КА «Космический телескоп» в разрезе

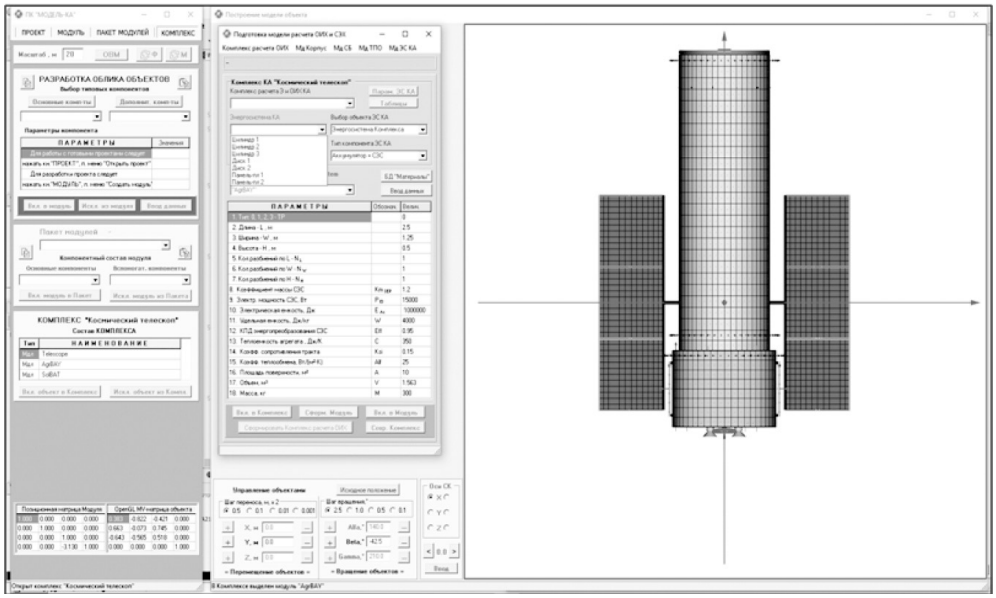

Рис. 4. Главная форма ПК разработки конструкции КА «Орбита»

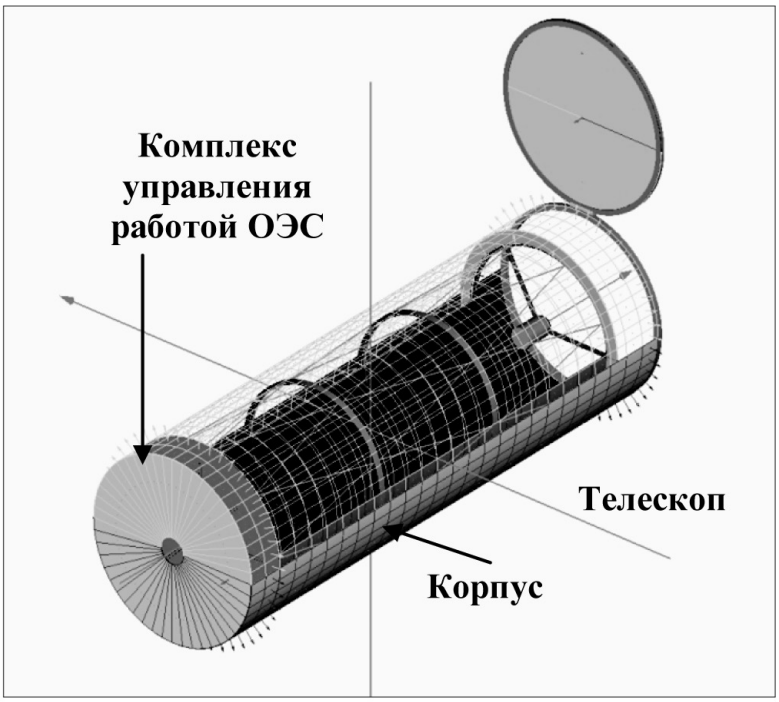

Рис. 5. Телескоп

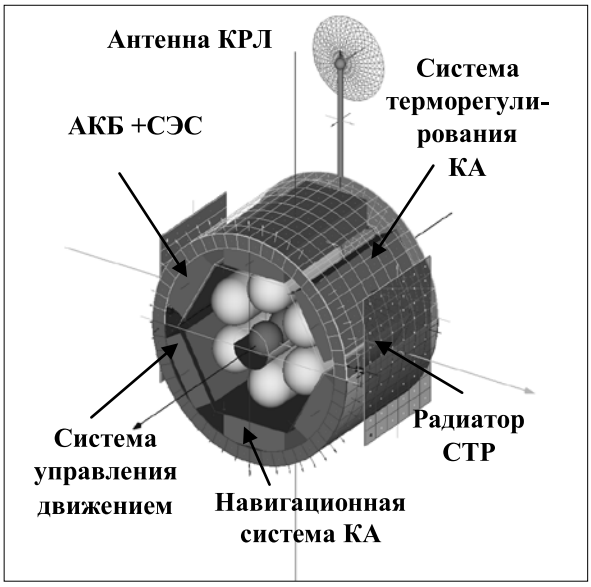

Рис. 6. Агрегатный отсек

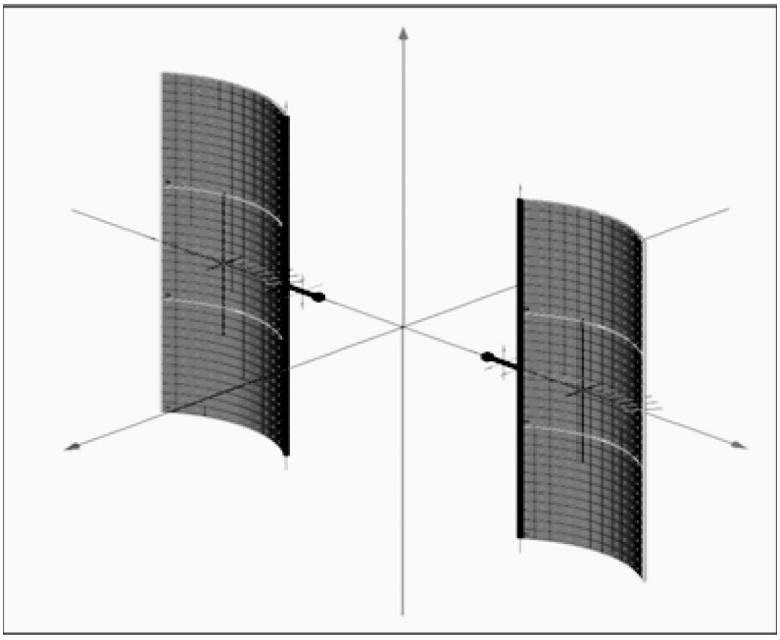

Рис. 7. Солнечная батарея

гатного отсека и солнечной батареи, показан на рисунках 5–7.

Рассмотренные модули содержат достаточно большое количество структурных компонентов, как основных, так и вспомогательных. После создания конструкции Комплекса выполняется формирование его энергосистемы.

На этом этапе в меню Комплекс выбирается пункт «Формирование энергосистемы КА», в результате чего в средней части главной формы появляется панель «Подготовка модели расчёта ОИХ и СЭХ».

Используя управляющие элементы панели, выполняются процедуры присвоения всем наиболее значимым элементам конструкции надлежащих теплофизических, оптических и массовых характеристик. Завершается этот, достаточно трудоемкий процесс установлением энергетических связей между элементами конструкции и энерго-балансных соотношений.

На рис. 8 показана такая модель, которая строится в виде самостоятельного расчётно-демонстрационного модуля.

Завершается процесс разработки конструкции КА заданием орбитальных и ориентационно-навигационных параметров его полёта. Эти операции выполняются в редакторах, вынесенных на специальные панели, которые вызываются из соответствующего пункта главного меню «КОМПЛЕКС»

Заключение

Разработан подход к формализации процесса построения моделей КА, его модулей и систем на основе выявления конструктивных и логических связей между элементами структуры.

Представлены расчётные модели разбиения некоторых поверхностей на элементы одинаковой площади, позволяющие сформировать облик элементов конструкции КА на основе их геометрических характеристик.

Разработаны принципы построения моделей сложных космических объектов с использованием предложенного формализма для оценивания их функциональных характеристик в орбитальном полёте при выполнении конкретных целевых задач.

Применение разработанных подходов показано на примере создания модели КА «Космический телескоп».

Литература

1. Гущин, В. Н. Основы устройства космических аппаратов / В.Н. Гущин. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

2. Туманов, А. В. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учебное пособие / А.В. Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017 – 572.

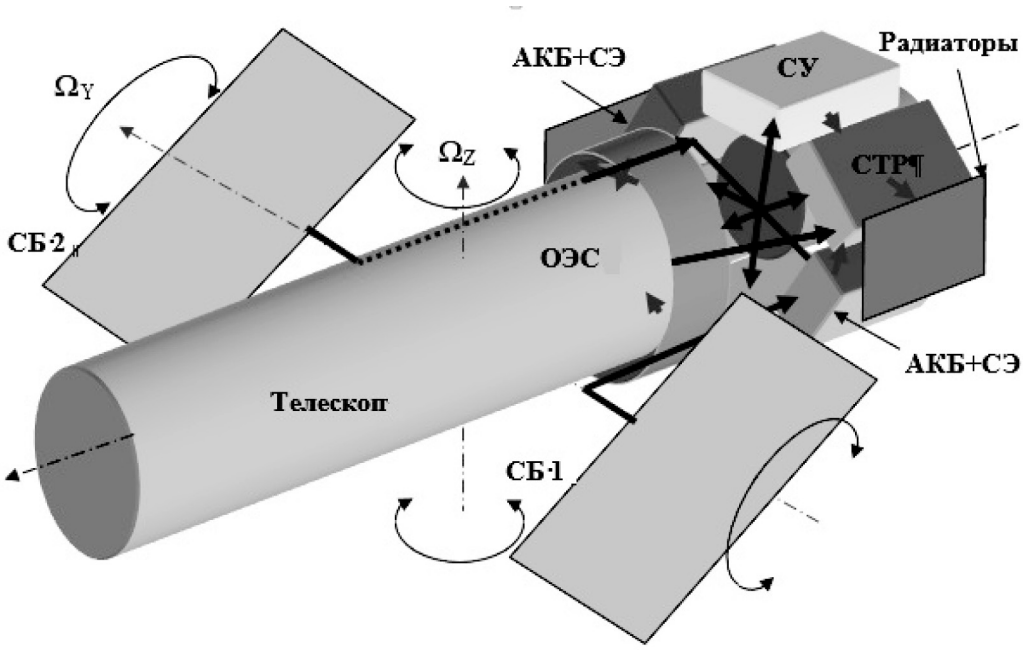

Рис. 8. Расчетная модель энергосистемы КА «Космический телескоп»

3. Математическое моделирование теплообмена основных элементов энергетического оборудования космических аппаратов / Л.К. Горшков [и др.] // Информация и Космос. – 2017. – № 2. – С.160–167.

4. Эйнджел, Э. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL [: пер с англ.] / Э. Эйнджел. – 2-е изд. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 592 с.

5. Шикин, А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели / Шикин А. В., Боресков А. В. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 464 с.