

## **Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов**

**Куи Мин Хан\*, Маркин Л.В.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [kyiminhhan50@gmail.com](mailto:kyiminhhan50@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [markinl@list.ru](mailto:markinl@list.ru)*

### **Аннотация**

В статье рассмотрено решение проблемы автоматизации проектирования размещения и ориентации солнечных батарей (панелей) и концентраторов на космических летательных аппаратах. Цель исследования - оценить взаимное затенение солнечных батарей как между собой, так и другими объектами (например, космической станцией). Данная задача рассматривается как оптимизационная задача математического программирования, направленная на максимально эффективное использование этих высокотехнологичных источников энергии в космических орбитальных станциях и космических поселениях. Метод решения - геометрическое моделирование космической станции и солнечных батарей с определенной ориентацией. В качестве метода моделирования использованы рецепторные геометрические модели, дискретизирующие пространство размещения как батарей, так и самой космической станции. На основании рецепторной расчетной модели затенения разработана имитационная

процедура оптимизации основных конструктивных решений (параметров размещения солнечных батарей) при заданном направлении освещения.

**Ключевые слова:** космические летательные аппараты, солнечные батареи, внешняя компоновка, затенение солнечных батарей, автоматизация проектирования, геометрическое моделирование, рецепторные геометрические модели, рациональные конструктивные решения, имитационное моделирование.

## Введение

В данной работе рассматривается автоматизация проектирования размещения солнечных батарей на космических летательных аппаратах (КЛА) и солнечных концентраторах при колонизации планет и их спутников (рисунок 1а) [1]. Такая же проблема возникает при проектировании гелиоэлектростанций на земле (рисунок 1 б). В последнем случае солнечные батареи принято называть гелиостатами. Актуальность такого исследования обусловлена тем, что на земле гелиоэнергетика является источником экологически чистой энергии, а в космосе – зачастую единственным источником жизнеобеспечения внеземных поселений и обитаемых космических станций [2 - 4]. Сразу оговоримся, что речь идет о полях концентраторов и солнечных батарей летательных аппаратов, не обеспечивающих слежение за изменением положения Солнца.



*a)*



*б)*

Рисунок 1 - Солнечные батареи в космосе (*a*) и на земле (*б*)

Разработка систем автоматизированного проектирования требует создания соответствующего алгоритмического и математического обеспечения. Так как в данной задаче решаются задачи размещения объектов, то она по своей сути является задачей геометрической. Поэтому и методы ее решения следует искать в геометрическом моделировании размещения на КЛА солнечных батарей или солнечных концентраторов.

Сложность геометрического моделирования размещения концентраторов в том, что решение этой задачи требует взаимосвязанного решения двух проблем:

- вычисление эффективной площади солнечных батарей (панелей) КЛА или на внеземном поселении при любой конкретной ориентации КЛА по отношению к потоку солнечной энергии или же статичных солнечных батарей (гелиостатов) на внеземных поселениях;

- разработке аппарата оптимизации количества и геометрии (т.е. конкретных размеров и формы) размещенных на КЛА или на определенной площади внеземного поселения гелиостатов.

Основная проблема связана с тем, что солнечные батареи располагаются группами (на КЛА) или полями (на внеземных поселениях) и при этом частично экранируют друг друга. На КЛА они также будут дополнительно экранироваться самим космическим объектом (рисунок 2). Поэтому если на определенном объекте солнечных батарей будет мало, то и съём энергии Солнца будет маленьким, если же слишком много – то они будут работать неэффективно, затеняя друг друга.



Рисунок 2 - Частичное затенение солнечной батареи на орбите

### **Постановка задачи исследования**

Всего за три дня Солнце посылает на Землю столько энергии, сколько её содержится во всех разведанных запасах ископаемых топлив, а за 1 сек. – 170 млрд. Дж. Как по экономическим, так и экологическим причинам в мире все большее

внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, среди которых первое место занимает солнечная энергия. Потенциальные возможности энергетики, основанные на использовании непосредственного солнечного излучения, чрезвычайно велики. Исследования показывают возможность использования солнечной энергии как основной даже для атмосферных летательных аппаратов [5]. Роль же солнечной энергии в космосе возрастает многократно, так как она не требует для получения доставки больших масс углеводородного топлива и кислорода для его сжигания.

Сам процесс получения энергии (прежде всего электрической) из солнечной радиации основан либо на прямом преобразовании солнечной энергии в электрическую посредством полупроводников (как это производится на орбитальных станциях и спутниках), либо выработки энергии посредством тепловых машин (такая схема чаще используется на земле). В любом случае использование солнечной энергии в космосе более эффективно, чем на земле, так как там отсутствует потеря энергии в атмосфере и оседание пыли на панелях, снижающее выработку энергии до 40% .

С математической точки зрения сведем задачу оптимизации размещения солнечных батарей КЛА или стационарных гелиостатов к задаче математического программирования. Предположим, что у нас имеется пространство размещения солнечных батарей (или гелиостатов)  $\Omega$ , в котором нам необходимо разместить и ориентировать  $n$  солнечных батарей (или гелиостатов). Полученное решение (один из возможных его вариантов) обозначим  $X$ . С учетом установленной этим решением  $X$  конкретной геометрии солнечных батарей КЛА и их расположением относительно

самой КЛА из области допустимых решений  $\Omega$  и ориентацией самой КЛА относительно потока энергии  $W$  (в каждый момент времени  $t$  каждая из  $n$  солнечных батарей будет иметь эффективную площадь поглощения энергии  $s_i(t)$ , а все вместе в данный момент времени –  $S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n s_i(t)$ ). Наша цель – получить в данный момент (т.е. при данной ориентации КЛА) максимальную энергию солнца, определяемую максимальной эффективной площадью солнечных батарей, что можно записать в виде выражения

$$\text{Max}_{P_x \rightarrow \min} S_{\Sigma}(t) \text{ для } X \subset \Omega.$$

Из этого выражения следует, что максимум энергии должен быть получен при дополнительных ограничениях – варианте  $X$  размещения гелиостатов в области допустимых решений  $\Omega$  и минимизации потерь энергии  $P_x$ , обусловленных взаимным затенением солнечных батарей как солнечными батареями, так и самим КЛА. Очевидно, что требование принадлежности  $X$  области допустимых решений  $\Omega$  содержит внутри себя еще множество дополнительных ограничений – как общих (минимизация занимаемой площади), так и конкретных ограничений, обусловленных, например, неплоскими панелями солнечных элементов, площадями, занятыми дополнительными силовыми элементами на них, не участвующих в выработке электроэнергии и т.п.).

Очевидно, что максимальная энергия вырабатывается солнечными батареями тогда, когда они не затеняются сами корпусом космической станции и не затеняют

друг друга. Если они конструктивно сделаны поворотными, то они должны быть ориентированы перпендикулярно направлению солнечных лучей.

В случае размещения солнечных батарей на обитаемых спутниках наше математическое описание может быть еще более усложнено дополнительным требованием – получение максимальной энергии не в каждый конкретный момент, а за все время нахождения Солнца в пределах его видимости гелиостатом, а получение максимального потока энергии  $Max P_{\Sigma}$  в определенное время  $t_0$ . Это запишется выражением

$$Max_{P_x \rightarrow \min} P_{\Sigma}(t) \text{ for } X \subset \Omega.$$

Такое «специфическое» требование может быть обусловлено необходимостью требования максимально возможного количества энергии за весь световой день на наземных станциях или время видимости Солнца на космическом летательном аппарате. Построение геометрических и оптимизационных моделей, учитывающих все эти факторы, и составляют предмет настоящего исследования.

В нашей расчетной модели примем, что на солнечные батареи КЛА суммарной площадью  $S$  с некоторого направления  $W$  падает поток солнечной энергии (рисунок 3 а). Тогда со стороны потока солнечной энергии (направления  $W$ ) КЛА будет виден как некоторая аксонометрическая проекция (рисунок 3 б). Очевидно, что видимая с этого направления площадь солнечных батарей  $S'$  будет меньше их реальной площади  $S$ , то площадь  $S'$  будет в данном случае именно той «рабочей» или эффективной площадью, т.е. той площадью солнечных батарей, которая перпендикулярна потоку энергии. Очевидно, что мы хотим, чтобы

солнечные батареи работали максимально эффективно, поэтому наша целевая функция  $S' \rightarrow \max$ .

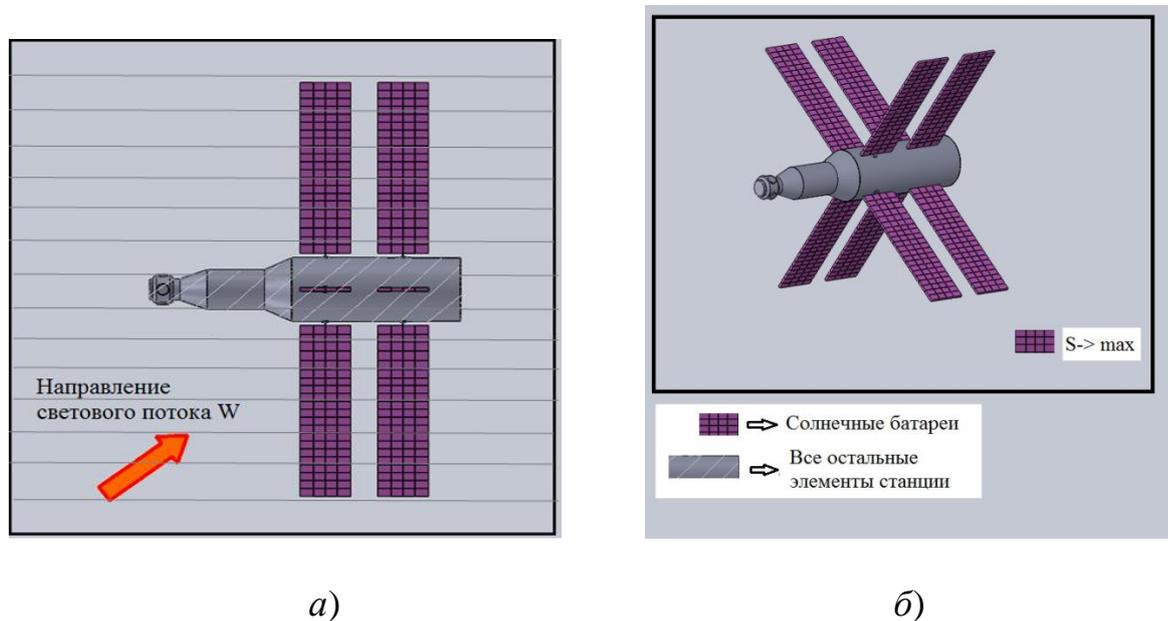


Рисунок 3 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (б)

Таким образом, исходя из заданной конструктором площади солнечных батарей  $S$  и заданного для расчета направления потока солнечной энергии  $W$  целью нашего исследования является выбор из множества допустимых конструктивных решений  $\Omega$  такого, которое бы обеспечило максимальную освещенность (т.е. минимальную площадь взаимного затенения батарей друг другом и космической станцией).

### Подходы к решению поставленной задачи

Используемые в настоящее время все методы инсоляционных расчетов принято делить на две группы – геометрические и энергетические. С помощью геометрических методов можно определить продолжительность инсоляции или

затенения участка, помещения или отдельной точки, характер перемещения солнечных лучей и т.п. [6, 7]. Энергетические же методы направлены на расчет непосредственно солнечной радиации (энергии солнца) и позволяют определить количество тепловой и световой энергии солнечных лучей в каждый момент времени на участке с определенным географическим положением [8, 9].

Методы первой группы основаны на аппарате начертательной геометрии, так как солнечные лучи распространяются прямолинейной. Исходными данными для таких задач является направление солнечного луча по отношению к исследуемому объекту. Направление луча, в свою очередь, определяется положением солнца, в условиях земной поверхности однозначно определяемым тремя параметрами – географическая широта местности, дата и время (рисунок 4). По примерно такой же траектории движется солнце и в космических поселениях.

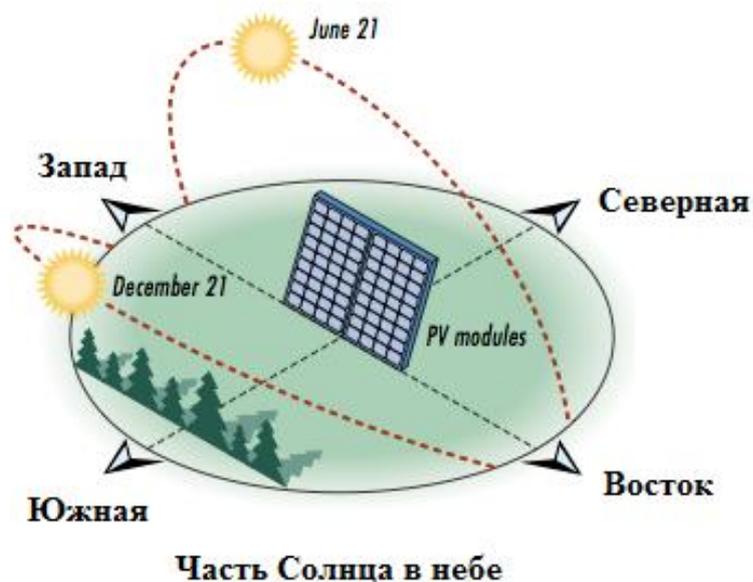


Рисунок 4 - Траектория солнца в зависимости от времени года и географического положения размещения гелиостата

При автоматизации проектирования любой техники на результат проектирования оказывает существенное влияние качество компоновки. Различают вопросы внутренней компоновки изделия (размещение в замкнутых пространствах с областями запрета необходимого перечня оборудования), так и внешняя (размещение объектов, внешних к корпусу КЛА). Если для авиастроения внешняя компоновка определяется в подавляющей степени законами аэродинамики, то в нашем случае таким специфичным требованием, как обеспечение оптимальной степени инсоляции.

Известно, что даже первые опыты компьютеризации процесса проектирования при решении отдельных частных задач показали их высокую эффективность. Работы по автоматизации размещения не составляли исключения. Первые публикации, посвященные автоматизации решения задач размещения, относятся к 60-м годам прошлого века и связаны с именами Л.В.Канторовича и В.А.Залгаллера по раскрою материалов методами линейного программирования. Однако переход от 2D объектов к 3D объектам и усложнение формы размещаемых объектов от линейных полос до реальных объектов современной техники вызвало лавинообразное усложнение математического описания процесса размещения. Несмотря на то, что исследованию этого вопроса посвящены труды многих замечательных ученых – эта задача далека от своего разрешения. Дополнительные сложности, связанные с решением этой задачи, заключаются в следующем:

- необходимость оперирования с геометрической информацией, представление которой в ЭВМ представляет собой отдельную и весьма непростую задачу;

- неочевидность алгоритма решения задачи оптимального размещения. Если для проектанта при решении этой проблемы достаточно интуиции, которая на самом деле она является сплавом прошлого опыта, ассоциативного мышления и пространственного воображения, то компьютер этими замечательными человеческими качествами не обладает, и поэтому нуждается в других механизмах мышления, которые должны быть переданы ему человеком посредством специального математического и программного обеспечения.

Что касается первой проблемы – представления геометрических образов в ЭВМ, то та сложнейшая проблема с различных аспектов исследовались в трудах многих отечественных и зарубежных ученых. В их трудах содержатся как классические, так и компьютерно - ориентированные методы задания, расчета и воспроизведения геометрических форм.

Однако эти методы не работают в условиях нашей специфической задачи – определения эффективной площади солнечных батарей КЛА. Поэтому для ее решения мы применим сравнительно редко используемый метод геометрического моделирования – метод дискретизации пространства, или рецепторные геометрические модели. В основу рецепторного метода (известного также как «матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д., а в англоязычной литературе как "воксельный" - как сокращение "volume element" - "элемент объема") положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Для плоского случая поле рецепторов представляет собой однородную прямоугольную сеть  $m \times n$ , каждая клетка которой рассматривается как отдельный рецептор, который может иметь два состояния – «0»

или «1». Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством  $A = \{a_{i,j}\}$ , где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден,} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден} \end{cases}$$

Рецептор считается невозбужденным, если через него не проходит граница объекта и он не принадлежит внутренней области (рисунок 5).

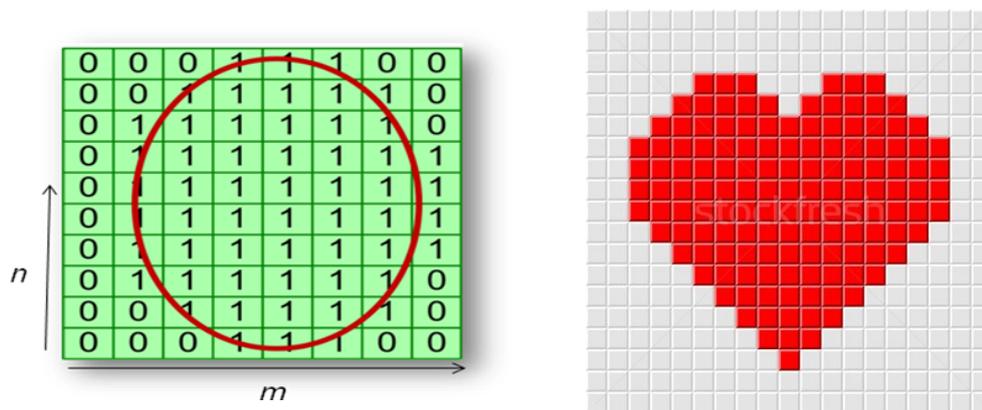
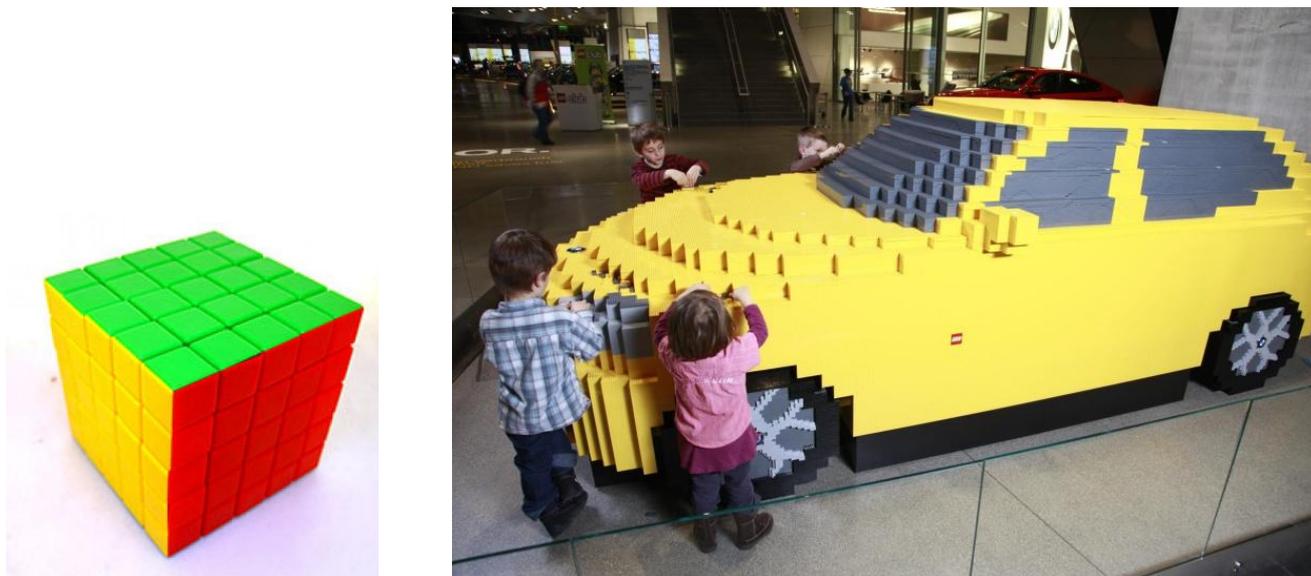


Рисунок 5 - Рецепторные модели 2D-объекта

Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей  $A = \{a_{i,j,k}\}$  размерностью  $m \times n \times p$ , внешне напоминающей кубик Рубика (рисунок 6 а). Объект любой геометрической формы и топологической сложности можно собрать из таких кубиков (рисунок 6 б), однако при его внешней узнаваемости присущая рецепторному методу моделирования "ступенчатость" объекта не позволяет оценить его дифференциально-геометрические характеристики (гладкость, кривизну формы и др.), но в ряде технических задач этого и не нужно. Очевидно, что чем меньше размер каждого рецептора (а мы будем использовать именно это рускоязычное

слово), то тем точнее будет описана форма объекта, но и тем больших ресурсов ЭВМ поребуется для его описания.



*a)*

*б)*

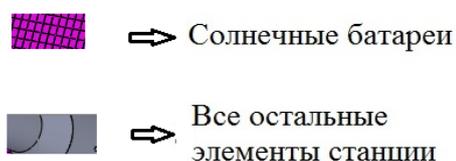
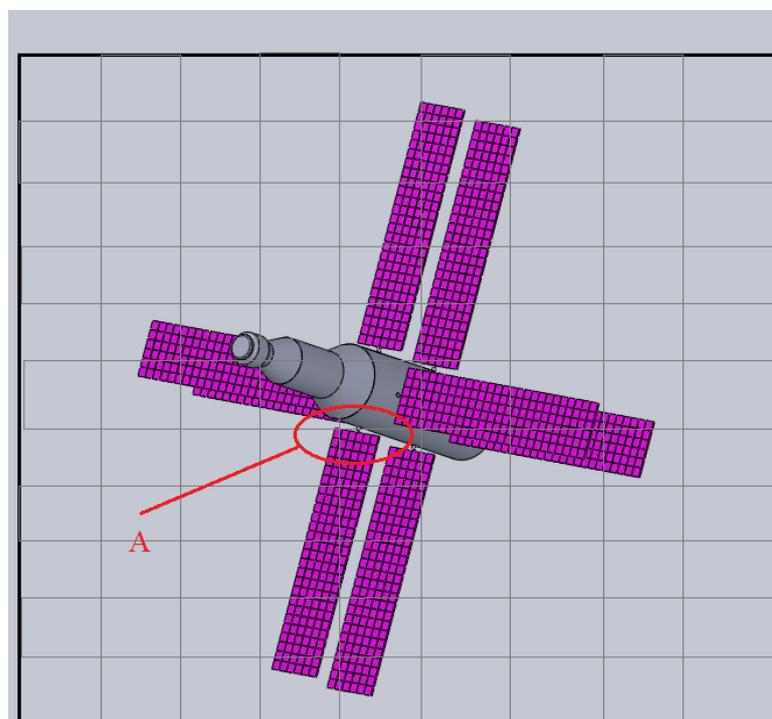
Рисунок 6 - Рецепторная матрица (*a*) и рецепторная модель 3D-тела (*б*)

Рецепторный метод геометрического моделирования (впрочем, как и любой другой метод) имеет свои как преимущества, так и недостатки. Преимуществом рецепторных геометрических моделей является легкость решения многих позиционных задач геометрии (например, определение условия взаимного непересечения объектов, описанных рецепторными моделями), недостатками – необходимость преобразования пространственных объектов, описанных средствами конструктивной геометрии в технической документации, в рецепторную форму и обратное преобразование. Вопросы компьютерной реализации рецепторных моделей, бывшие преткновением на начальном этапе развития вычислительной техники, когда эти рецепторные модели и были предложены А.Д.Зозулевичем

(середина 60-х годов прошлого века) [10, 11], в настоящее время успешно преодолены развитием аппаратных и программных средств вычислительной техники [12].

## Используемые в исследовании методы и алгоритмы

Итак, переведем геометрическое описание КЛА (вместе с солнечными батареями) в рецепторную форму. При этом используем маленькую хитрость – разместим его в рецепторной матрице так, чтобы направление источника света  $W$  совпадало с направлением граней рецепторной матрицы (рисунок 7), а сам КЛА находился в рецепторной матрице под некоторыми углами относительно граней, соответствующим его ориентации в пространстве относительно вектора  $W$ .

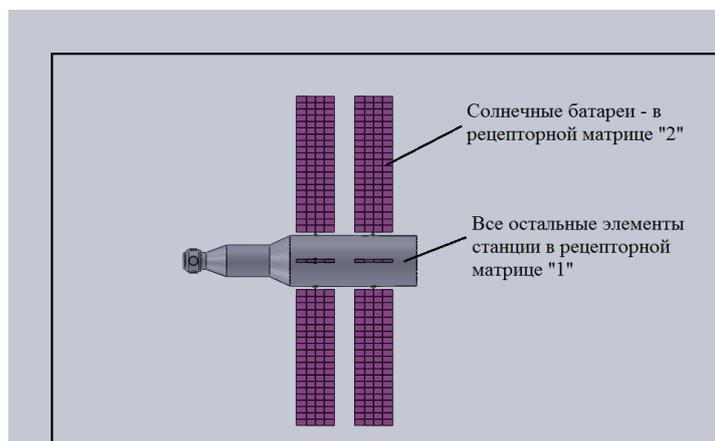


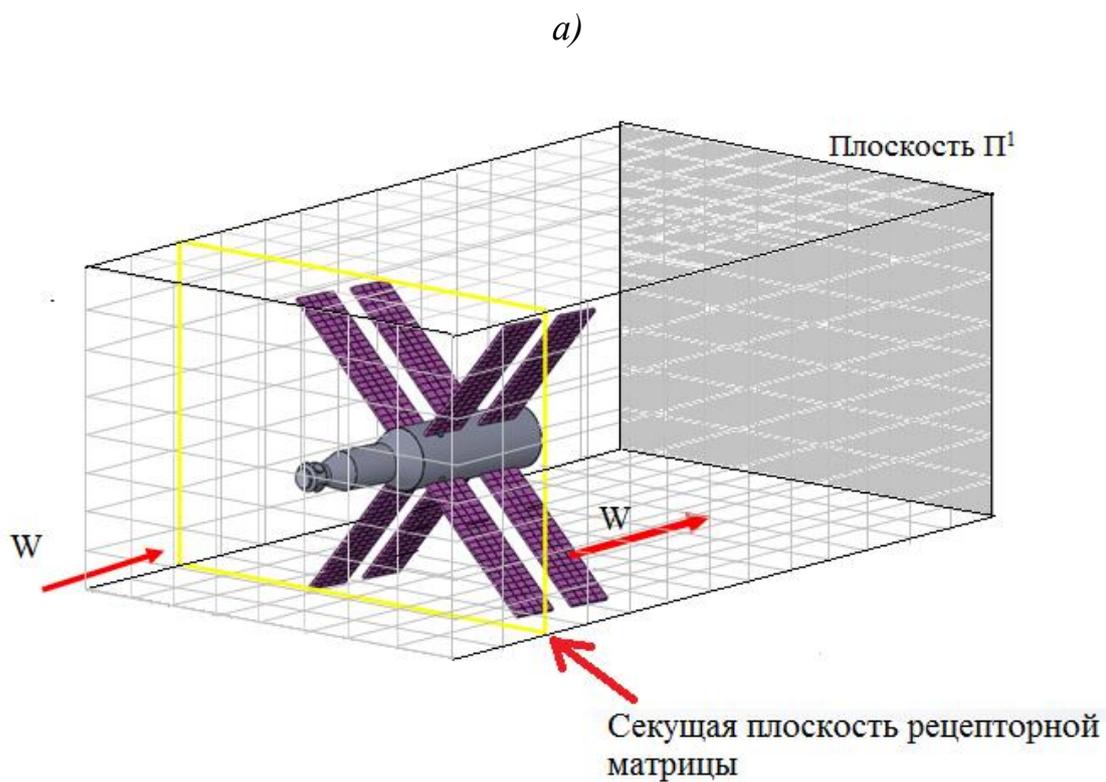
## Рисунок 7 - Представление КЛА рецепторной матрицей

Особенностью нашего подхода – рецепторная матрица будет многозначной. Конкретно она будет трехзначной – «0» - свободное пространство, «1» - пространство, занятое космической станцией, «2» - пространство, занятое солнечными батареями (рисунок 8 *а*). В этом случае КЛА будет представлена в рецепторной матрице так, как показано на рисунке 8 *б*.

Возникает вопрос, как же создать рецепторную матрицу, с помощью миллионов кубиков описывающую геометрическую форму реального космического аппарата? Для этого нами разработана вычислительная процедура, позволяющая твердотельную модель КЛА, созданную в любой САД-системе (в нашем случае в SolidWorks) [13, 14] преобразовать в рецепторную матрицу заданной дискретности (рисунок 9).

Использование рецепторной геометрической модели позволяет произвести над ней следующие операции. Задав положение поля рецепторов в виде некоторого среза рецепторной матрицы (как это показано на рисунке 8 *б*) при каждом конкретном положении среза мы получим образ КЛА, примерный вид которого показан на рисунке 10 *а*.





б)

Рисунок 8 - Представление КЛА многозначной рецепторной матрицей

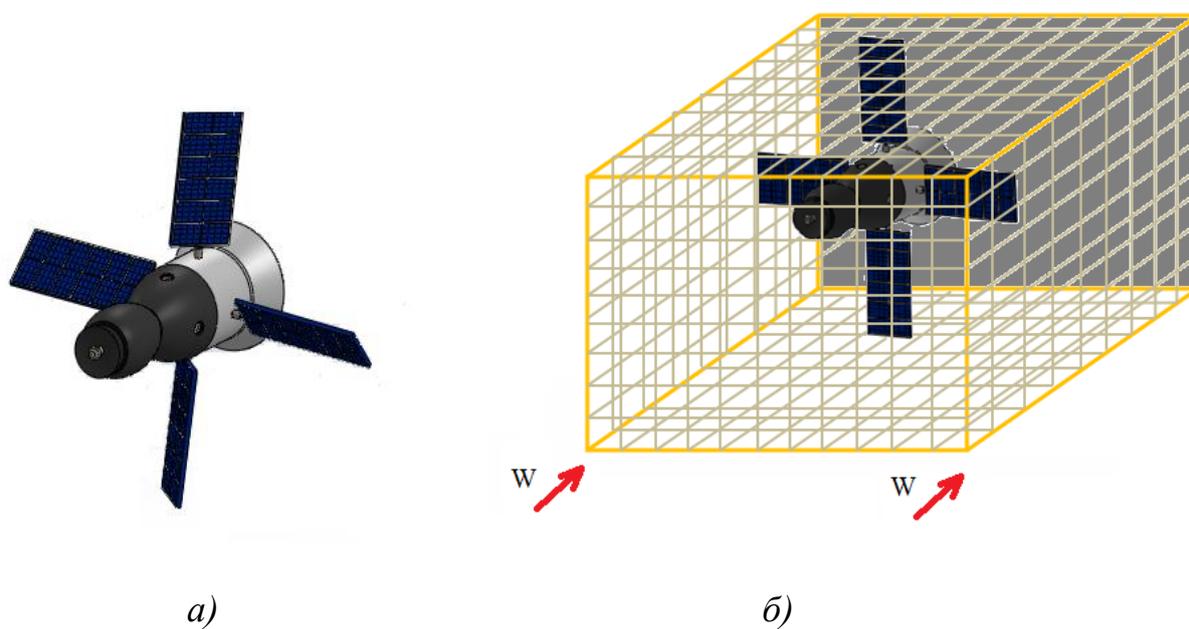
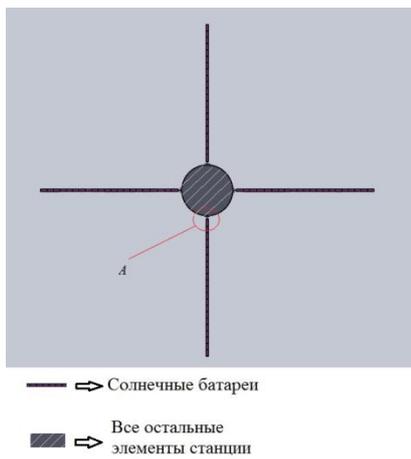


Рисунок 9 - Твёрдотельная модель КЛА (a), преобразованная в рецепторную геометрическую модель (б)



a)

A (Увеличено)

0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	2	2	0	1	1	1
0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
0	0	0	0	2	2	0	0	0	0

б)

Рисунок 10 - Изображение КЛА на срезе рецепторной матрицы (a) и фрагмент рецепторной матрицы в зоне А (б)

В итоге мы, проецируя срез каждой матрицы на некоторую плоскость проекций  $\Pi'$ , получим суммарный образ совокупности определенных единиц – нулей, единиц или двоек. Он будет похож на графический образ, представленный на рисунке 10. Это плоская рецепторная матрица, в которой «0» – проекция свободного пространства, «1» – проекции корпуса космической станции при данной ее ориентации и «2» - проекции всех солнечных батарей.

Одно из положительных свойств рецепторных геометрических моделей – возможность быстрого расчета сумм значений рецепторов. Имея матрицу типа 2 мы можем рассчитать суммарное значение «двоек» и тем самым, эффективную площадь солнечных батарей при некоторой совокупности конструктивных параметров  $X$ . Проводя такой расчет для совокупности значений  $X$  и совокупности и вычисляя в каждой такой комбинации значение  $S'$  мы можем построить графики, примерный

вид которых представлен на рисунке 11. На этом графике мы можем выявить наиболее удачное сочетание конструктивных параметров расположения солнечных батарей и учесть эти данные как в процессе конструирования КЛА, так и подсчете возможностей энергоснабжения КЛА при ее различной ориентации относительно Солнца.

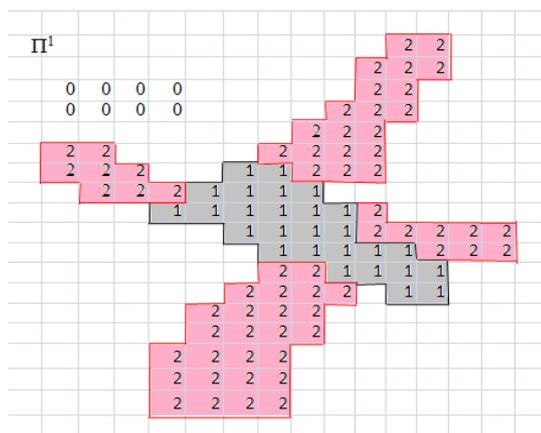


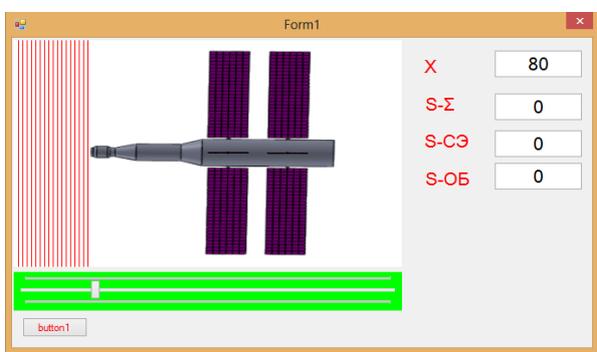
Рисунок 11 - Пример итогового геометрического образа проекций элементов КЛА на плоскость проекций  $\Pi'$

## Результаты проведенного исследования

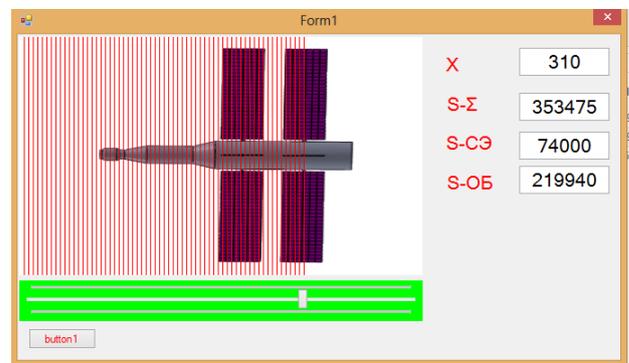
На основании предложенной модели был создан программный комплекс, реализованный на языке C#, позволяющий моделировать эффективную площадь солнечных концентраторов. При этом разработана графическая оболочка, позволяющая увидеть численное значение полученных результатов.

Работа программного комплекса происходит следующим образом. После ввода информации о геометрических размерах станции и солнечных батарей (в параметрическом виде) начинается послойное сканирование сечений (рисунок 11). При этом из 3D матрицы, в которую погружен весь наш объект (КЛА), в каждом

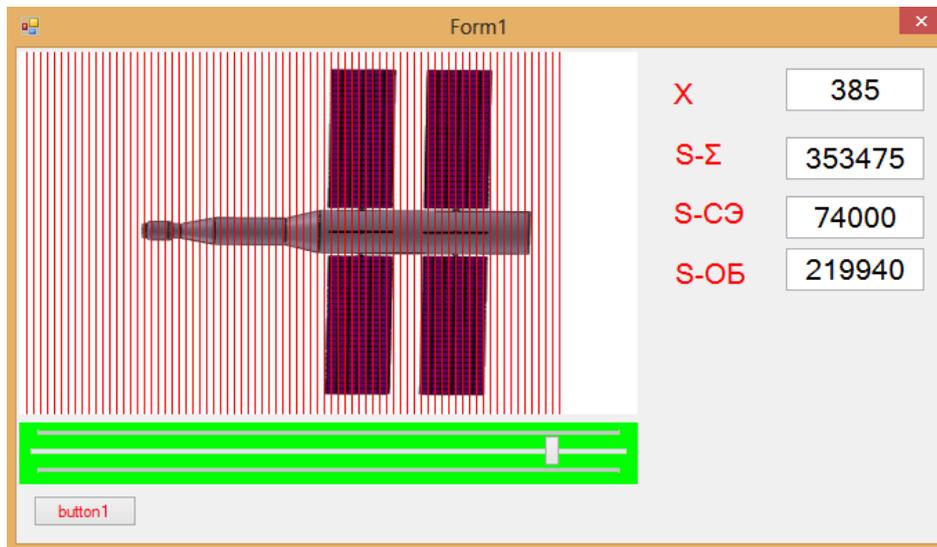
слое формируется 2D матрица, вид которой ранее был показан на рисунке 11. При этом в каждом сечении (срезах) рецепторной матрицы вычисляются площади текущего сечения солнечных батарей, эффективная (накопленная) площадь сечений солнечных батарей и накопленная площадь сечений корпуса космической станции (хотя этот параметр для нас практического значения не имеет). На рисунке 12 *а* видно, что секущая плоскости еще не дошли до модели КЛА, поэтому все площади сечений равны нулю.



*а)*



*б)*



*в)*

Рисунок 12 - Сканирование 3D модели КЛА для вычисления площадей сечений солнечных батарей и корпуса КЛА

На рисунке 12 б видно, что секущая площадь проходит уже по самому КЛА, пересекая при этом как солнечные батареи, так и корпус КЛА, поэтому в каждом сечении площади среза получают конкретные вычисленные значения, которые визуализируются в соответствующих окнах программы. И, наконец, на рисунке 12 в видно, что секущая плоскость полностью прошла через всю 3D модель КЛА, поэтому как текущие, так и накопленные суммы площадей в окнах программы больше изменяться не будут. Таким образом, мы решили поставленную задачу - определили суммарную видимую площадь (с определенного ракурса) как копуса космической станции, так и ее солнечных батарей.

Правда на рисунке 12 секущая плоскость перемещалась ортогонально положению станции, что на практике бывает лишь в том случае, если станцию строго ориентирована по направлению "на Солнце". Но ничто нам не мешает изменить ориентацию станции по направлению к Солнцу и провести такое же исследование (риунок 13).

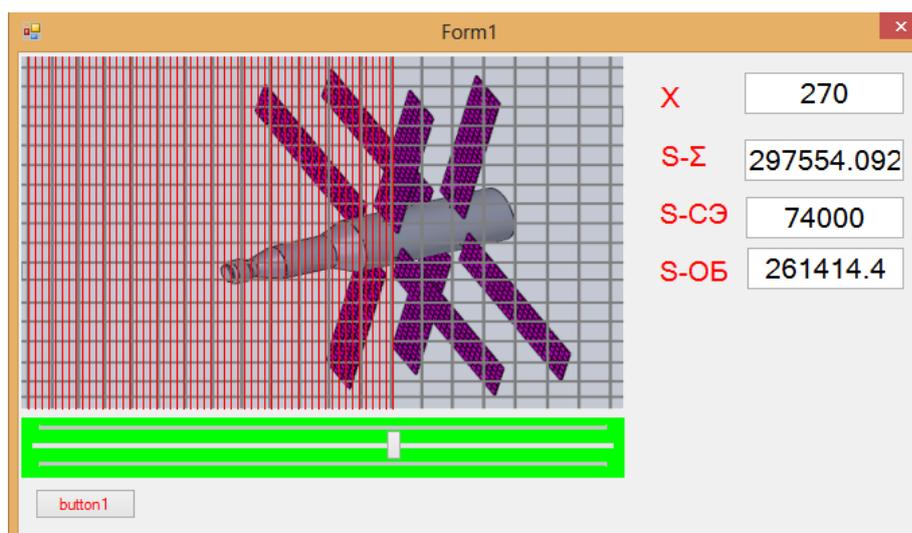


Рисунок 13 - Расчет эффективных площадей КЛА при его произвольном положении относительно направления солнечных лучей

## Использование полученных результатов

Проведение описанного расчета при заданной исходной геометрии КЛА и его ориентации относительно Солнца позволяет построить как график изменения эффективных площадей по дистанции сканирования сечений так и суммарную эффективную площадь. Таким образом, мы *получили результат проверочного расчета эффективной площади солнечных батарей для КЛА заданной формы и геометрии при заданном ракурсе его освещения Солнцем*, что само по себе уже неплохо.

Но при этом возникает вопрос оптимальности полученного результата - насколько удачны исследованная нами форма и расположение солнечных батарей  $X_j$  из множества допустимых решений  $\Omega$ ? Нельзя ли улучшить значение  $S_\Sigma$  выбрав какое либо другое конструктивное решение  $X_j$ ?

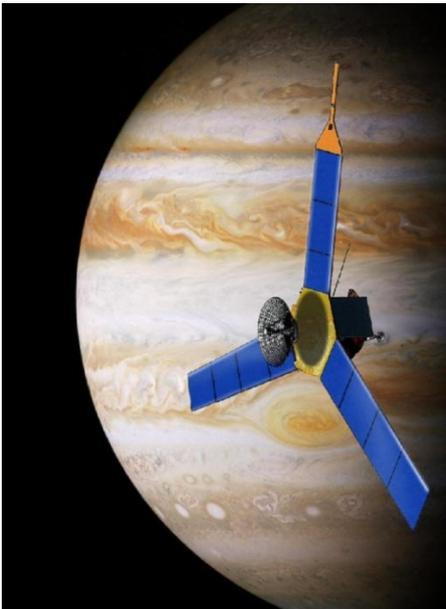
Рассмотрим этот вопрос подробнее. Простейшее с конструктивной точки зрения линейное расположение солнечных батарей на КЛА Союз (рисунок 14 а) может быть продублировано как по длине (на КЛА Росса - рисунок 14 б), так и круговым расположением относительно центральной оси (на КЛА Джуно - рисунок 14 в). Если на все предыдущих примерах солнечные батареи были установлены неподвижно, то на современных КЛА они могут вращаться относительно своей оси, как на европейском КЛА Марс-экспресс (рисунок 14 г). Кроме того, сами солнечные батареи могут располагаться не в плоскости, а под некоторым углом друг относительно друга (рисунок 14 д). Рассмотрение еще более экзотических форм солнечных батарей (рисунок 14 е) выходит за пределы нашего исследования.



a)



б)



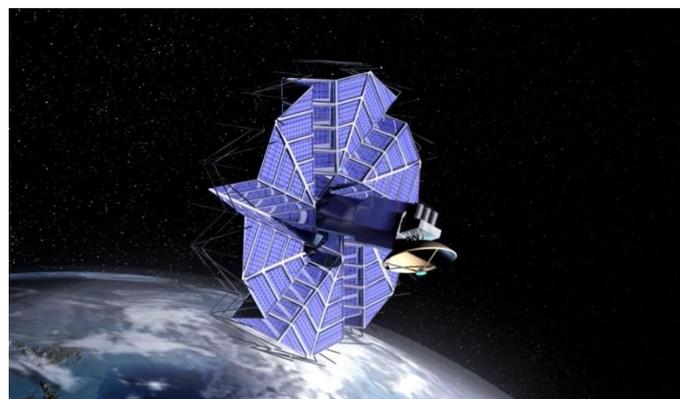
в)



г)



д)



е)

Рисунок 14 - Варианты конструктивного выполнения солнечных батарей на КЛД

Итак, даже для простейшего конструктивного решения  $X_i$ , изображенного на рисунке 14 а, при заданном ограничении на область допустимых конструктивных решений  $\Omega$  в виде заданной общей площади солнечных батарей  $S$  их конструктивное исполнение будет определяться тремя параметрами (рисунок 15) -  $l$  - расположением передней кромки солнечных батарей в системе координат КЛА;  $h$  - длиной одной панели и  $b$  - шириной одной панели. При этом мы приняли допущение о симметричности КЛА и неизменности ширины панелей  $b$ , хотя из рисунка 14 видно, что это не совсем так. Эти принятые нами допущения позволили нам избежать введения еще двух дополнительных конструктивных параметров.

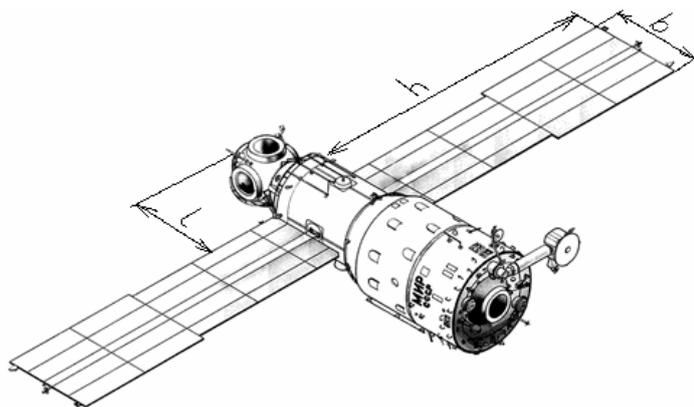


Рисунок 15 - Параметры простейшего конструктивного исполнения солнечных батарей (на примере КЛА "Союз")

Так как общая площадь солнечных батарей в нашем случае определяется простейшей формулой  $S=2 \cdot b \cdot h$ , то при заданном фиксированном значении  $S$  вроде бы для исследование достаточно анализа только одного параметра -  $b$  или  $h$ , но это не так. Параметр  $l$ , не влияющий на площадь  $S$ , также должен будет учитываться, так как оказывает существенно влияние на затенение батарей корпусом КЛА. Итак.

в простейшем приближении и принятых допущениях для КЛА, изображенного на рисунке 15, мы должны будем с использованием описанной методики геометрического моделирования затенения выбрать конструктивное решение из наиболее благоприятного для нас сочетания 2-х конструктивных параметров - ширины батареи  $b$  (если он нам нравится больше, чем длина панели  $h$ ) и параметра расположения  $l$ . Однако по мере усложнения конструктивного исполнения КЛА количество таких параметров будет все более добавляться. Так при конструктивном исполнении КЛА, изображенном на рисунке 14 б, мы должны будем добавить группу параметров, описывающих следующие группы панелей, при КЛА, изображенном на рисунке 14 в - количество панелей относительно оси КЛА, для КЛА на рисунке 14 г - угол поворота панелей относительно КЛА в направлении Солнца, для КЛА на рисунке 14 д - параметры "гармошки" и т.д. Таким образом в общем случае конкретное конструктивное исполнение  $X$  будет функционалом достаточно большого количества конструктивных параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ,  $X=f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ . Очевидно, что на каждый из конструктивных параметров  $a_i$  будут наложены ограничения (например, параметр расположением передней кромки солнечных батарей  $l$  не может превышать общую длину КЛА).

Поэтому следующей задачей исследования является выбор метода оптимизации функции (строго говоря функционала)  $X$  из допустимого множества конструктивных параметров  $\Omega$ , описываемых совокупностью независимых параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Очевидно, что с учетом сложности поставленной задачи и разнообразием конструктивных исполнений КЛА нам не удастся построить непрерывные аналитические функции цели и использовать в расчетах градиентные

методы оптимизации. Нашей задачей является определение глобального экстремума или приближенного к нему значения)многоэкстремальной функции в пространстве  $\mathcal{N}^n$ , для которой сравнительно просто находить значения самой функции, но невозможно описать ее аналитически и произвести полный перебор локальных экстремумов в силу большого их количества. Примерный вид целевой функции  $X$  для простейшего двумерного случая приведен на рисунке 16. Отсутствие аналитического описания исследуемой функции исключает использование градиентных методов поиска экстремума, поэтому единственным способом поиска экстремума для нас остается слепой случайных поиск [15]. В нем случайным образом подбирается и разыгрывается совокупность параметров  $\{a_{ij}\}$  из области допустимых значений параметров. Для этой совокупности параметров вычисляется значение функции цели, а из набора комбинаций исходных данных запоминается рекордное значение функции цели и совокупность параметров, ему соответствующих.

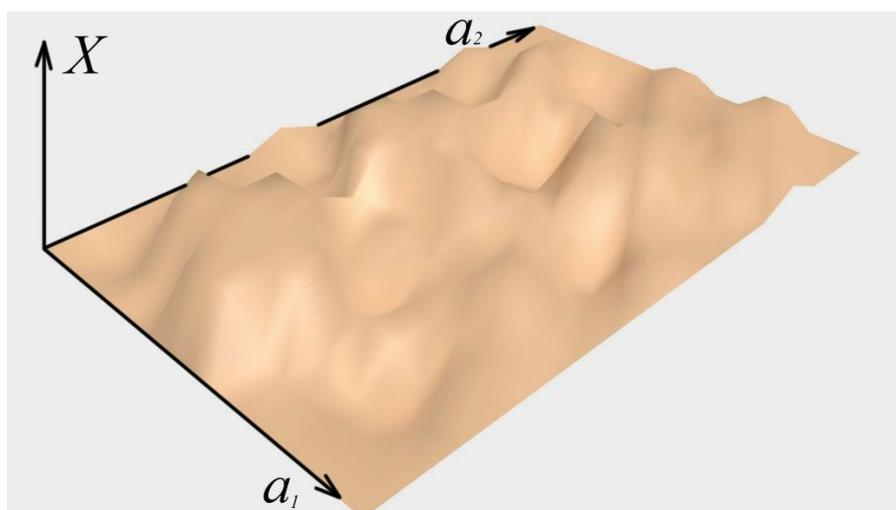


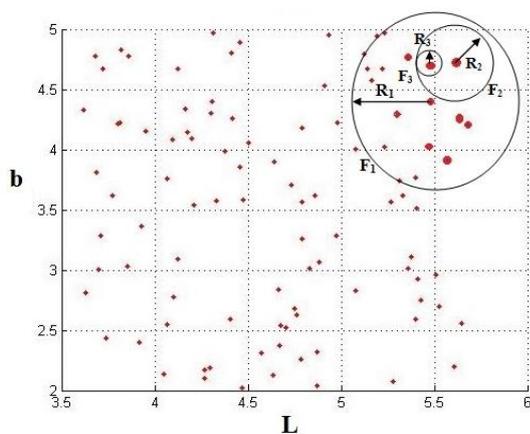
Рисунок 16 - Примерный вид функции цели  $X$  для 2-х переменных

Учитывая "непредсказуемость" поведения оптимизируемой функции будем искать рациональные решения среди методов имитационного моделирования. Известных попытки модификации слепого поиска, из которых нам кажется наиболее удачным для нашей задачи методу сужающихся окрестностей, предложенный Стояном Ю.Г. и Соколовским В.З. [16, 17]. Суть метода заключается в том, что случайным образом выбираются комбинации переменных  $a_{1i}$  и  $a_{2j}$ , для которых вычисляется значение целевой функции  $X_{ij}$ . Среди множества значений целевой функции  $X_{ij}$  выбирается рекордное и дальнейших поиск значения целевой функции  $X$  производится уже вблизи этого рекордного значения. Таким образом, в этом методе уточнение решения достигается сужением диапазона изменения переменных вокруг найденного решения. Эта процедура повторяется неоднократно. Если при заданном числе испытаний не удастся найти ни одной точки в допустимой области, то это число постепенно увеличивается. Невозможность отыскания допустимой точки за приемлемое число испытаний указывает на очень узкий (целевидный) характер допустимой области, что практически встречается очень редко.

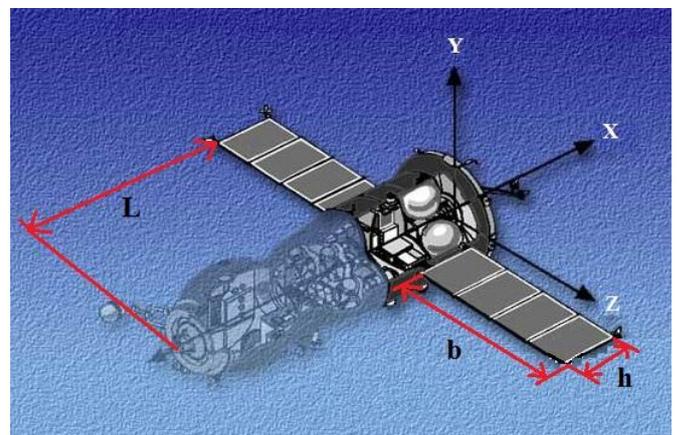
Описанный метод оптимизации не гарантирует нам достижения глобального оптимума целевой функции, поэтому мы вправе говорить о получении таким способом не глобального, а одного из локальных оптимумов функции  $X$ . Таким образом мы получим не оптимальное, а рациональное решение поставленной задачи. Учитывая, что оно справедливо лишь при строго определенном направлении падающего солнечного света нас не должно это сильно огорчать.

Пример процедуры оптимизации расположения солнечных батарей для КЛА с расположением солнечных антенн, показанном на рисунке 13 при фиксированном

направлении солнечного потока (также соответствующего рисунку 13) показан на рисунке 17. Полученные имитационным моделированием значения конструктивных параметров в нашем примере составили  $L=5,7$  м,  $b=4,91$  м и  $h=1,25$  м (напомним, что эти данные получены при фиксированном направлении солнечного потока в системе координат КЛА. Хотя эти размеры солнечных батарей получены проведением оптимизационной процедуры, приведенные выше результаты следует признать не оптимальным, а лишь рациональным решением, с чем нам придется смириться, так как оптимального решения мы получить все равно не сможем. Впрочем практика таких вычислений показывает, что такие результаты с увеличением точности проводимых расчетов улучшаются крайне незначительно, что позволяет нам говорить об их малом отличии от оптимальных результатов.



a)



б)

Рисунок 17 - Сужающиеся окрестности в области допустимых решений (а) и оптимизируемые конструктивные параметры КЛА "Союз" (б)

Хотя рецепторные геометрические модели, в силу своей дискретности, являются приближенными, исследование их точности в трудах Г.В.Корн, Ситу Лина

и Ньи Ньи Хтуна [18, 19] показало, что в реальных расчетах компоновок авиационной техники возможно обеспечение точности примерно в  $1 \text{ см}^2$  при продолжении вычислительного процесса 5...10 минут.

## **Выводы и рекомендации**

Предложен метод, позволяющий на основании рецепторной геометрической модели производить расчет эффективной площади солнечных батарей КЛА при различной совокупности его конструктивных параметров (геометрических форм) и ориентации относительно направления потока энергии. Разработаны математические модели и создан программный комплекс на языке С#, позволяющий производить такие расчеты и визуализировать полученные результаты. Разработана вычислительная процедура, позволяющая преобразовать созданную в любой САД-системе твердотельную геометрическую модель КЛА в рецепторную (матричную) модель заданной дискретности.

В результате работы этого программного комплекса при любой заданной геометрической форме КЛА и любой его ориентации относительно направления солнечных лучей возможно вычисление суммарной эффективной площади солнечных батарей с учетом их взаимного затенения и затенения корпусом КЛА. Показано, как данная процедура с использованием метода сужающихся окрестностей имитационным моделированием позволяет оптимизировать совокупность конструктивных параметров исследуемого КЛА, выходя на рациональные конструктивные решения.

## Библиографический список

1. Мельников В.М., Матюшина И.Н., Чернова Н.А., Харлов Б.Н. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53742>
2. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. Солнечная энергетика. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 276 с.
3. Мхитарян Е.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников.- Киев, Наукова думка, 1999. - 321 с.
4. Грилихес В.А. Солнечные космические энергостанции. - Л.: Наука, 1986. - 286 с.
5. Самойловский А.А., Лисейцев Н.К. Методика определения основных проектных параметров беспилотных летательных аппаратов, использующих для полета энергию солнечного излучения // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С 7-16.
6. Хейфец А.Л. Расчет продолжительности инсоляции средствами 3D моделирования пакета AutoCAD // Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование. 2004. Вып. 7. № 11(41). С 211-214.
7. Хейфец А.Л. Система автоматизированного расчета продолжительности инсоляции // Вестник Южно-Уральского университета. Строительство и архитектура. 2007. № 14(86). С. 51-54.
8. Штейнберг А.Я. Расчет инсоляции зданий. – Киев: Будивельник, 1975. - 120 с.
9. Гусев Н.М. Естественное освещение зданий. - М.: Госстройиздат, 1961. - 218 с.

10. Зозулевич Д.М. Машинная графика в автоматизированном проектировании. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
11. Герасименко Е.П., Зозулевич Д.М. Методы формирования трехмерных рецепторных матриц на ЭВМ // Вычислительная техника в машиностроении. – Минск: ИТК АН БССР, 1971. С. 24–31.
12. Толок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. - М.: Физматлит, 2016. - 112 с.
13. Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Курбатов А.С. Геометрическое моделирование авиационно-ракетных изделий // Прикладная геометрия. 2009. Вып. 11. № 22. С. 79-87.
14. Волошин В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
15. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. - М.: Мир, 2010. - 418 с.
16. Стоян Ю.Г., Соколовский В.З. Решение некоторых многоэкстремальных задач методом сужающихся окрестностей, - Киев: Наукова думка, 1980. - 206 с.
17. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. – Киев: Наукова думка, 1986, 266 с.
18. Ситу Лин. Разработка методов и геометрических моделей анализа незаполненных пространств в задачах размещения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - М., 2011. - 24 с.
19. Ньи Ньи Хтун. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - М., 2014. - 26 с.