

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи

УДК 515.2

Куи Мин Хан

**Математическое и программное обеспечение расчета
затененности солнечных батарей космических
летательных аппаратов**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ (технические науки)

Диссертация

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор Л.В. Маркин

Москва - 2017

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЗАИМНОГО ЗАТЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ	12
1.1 Анализ особенностей функционирования солнечных батарей на космических летательных аппаратах (КЛА) и на стационарных гелиостанциях.....	12
1.2 Математическая постановка задачи компоновки солнечных батарей на КЛА	18
1.3 Геометрические модели оценки взаимного затенения объектов	21
1.4 Основные виды геометрических моделей космических летательных аппаратов (КЛА).....	25
Заключение и выводы по разделу 1.....	31
2 РЕЦЕПТОРНЫЕ МОДЕЛИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ЗАТЕНЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КЛА	32
2.1 Сущность рецепторного метода геометрического моделирования.....	32
2.2 Использование рецепторного метода геометрического моделирования для оценки степени затененности солнечных батарей КЛА	38
2.3 Геометрическое моделирование степени затененности солнечных батарей КЛА при наклонном положении потока солнечной энергии	50
2.4 Оптимизация конструктивных параметров КЛА при компоновке солнечных батарей.....	55
Заключение и выводы по разделу 2.....	62
3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЦЕПТОРНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТЕПЕНИ ЗАТЕНЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КЛА И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	63

3.1 Программная реализация геометрического моделирования степени затененности солнечных батарей КЛА и визуализация результатов вычислений	63
3.2 Оценка точности и эффективности реализации геометрической модели степени затененности солнечных батарей КЛА	66
Заключение и выводы по разделу 3.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ	75
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	77
Приложение 1	104
Приложение 2	105

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

В данной работе рассматривается математическое моделирование и его программное обеспечение размещения солнечных батарей на космических летательных аппаратах и солнечных концентраторах при колонизации планет и их спутников. Такая же проблема возникает и при проектировании гелиоэлектростанций на земле. 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. Известно, что 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. Поток Солнечной энергии в направлении Земли столь велик, что в энергетическом эквиваленте за год составляет $38 \cdot 10^{20}$ кВт·ч [18], что в 10^8 раз больше, чем сегодня потребляется в мире [114]. Все это вместе с экологической чистотой солнечной энергии и практической неисчерпаемостью ресурсов Солнца делает целесообразным широкое использование солнечной энергетики как на Земле, так и при освоении космического пространства до орбиты Марса включительно.

Поэтому сегодня 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. 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. Кроме того, использование солнечной энергии в космосе более эффективно, чем на земле, так как там отсут-

ствует потери энергии в атмосфере и оседание пыли на панелях, снижающее выработку энергии до 40% .

В перспективе актуальность данного исследования будет только возрастать из-за возможности использования солнечной энергии не только в космосе, но и ее передачи на землю. Это обусловлено тем, что Солнце является природным термо-ядерным реактором, практически бесконечным по времени существования и безграничным по количеству вырабатываемой им энергии, в то время как природные запасы энергоресурсов иссякнут, по различным оценкам, через 50–100 лет. Решением проблем может стать создание космических солнечных электростанций (КСЭС) для трансляции энергии на Землю. Именно в последние 3...5 лет в технике появляются новые возможности использования КСЭС, как систем беспроводной передачи энергии. Столь кардинальное изменение ситуации связано с успехами в разработке волоконных лазеров, позволяющих формировать с орбиты узкий луч, на пять порядков меньший по площади СВЧ-луча на Земле. Эти технологии позволят в будущем доставлять электроэнергию в любые регионы планеты по значительно меньшей цене, чем стоит выработка электроэнергии на Земле [138,139].

В данной работе речь идет о полях концентраторов и солнечных батарей летательных аппаратов, не обеспечивающих слежение за изменением положения Солнца.

Повышение качества проектирования космических летательных аппаратов (КЛА) требует создания соответствующего алгоритмического и математического обеспечения. Поскольку в данной задаче решаются задачи размещения объектов и влияние этого размещения на прохождения солнечных лучей, то она по своей сути является задачей геометрической. Поэтому и методы ее решения следует искать в геометрическом моделировании размещения на космическом летательном аппарате (КЛА) солнечных батарей или солнечных концентраторов.

Объект исследования. Математические (основанные на геометрических) модели размещения солнечных батарей и определения эффективной поверхности

освещенности при различных вариантах расположения источника освещенности и затеняющих объектов (корпуса КЛА, других солнечных батарей и т.п.).

Предмет исследования. Методики, математические модели, алгоритмы и программы расчета эффективной площади освещения солнечных батарей.

Цель исследования. Повышение качества проектирования КЛА (снижение сроков проектирования, повышение энерговооруженности КЛА и снижение массы КЛА за счет увеличения плотности эффективно работающих солнечных батарей).

Задачи исследования:

- сформулировать физическую, математическую и геометрическую постановку задачи размещения солнечных батарей КЛА;
- разработать математические модели (основанные на геометрических) описания формы КЛА и солнечных батарей, позволяющих оценить степень затененности обитаемым модулем, так и другими солнечными батареями;
- разработать алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА;
- разработать программы реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета;
- разработать алгоритмы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей;
- провести верификацию и исследовать эффективность разработанных геометрических моделей, алгоритмов и программ их реализации методом численного эксперимента;

- провести внедрение полученных результатов исследования в промышленность и учебный процесс ВУЗа.

Методы исследования: Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования, инженерной и вычислительной геометрии. В процессе исследования использованы методы математического и геометрического моделирования, численного эксперимента, оптимизации и компьютерной графики в среде программирования C#.

Методологическую основу работы составляют методы геометрического и математического моделирования, классические методы математического программирования, дискретного анализа и теории множеств, теории алгоритмов. В математической постановке задача размещения солнечных батарей на КЛИА рассматривается как оптимизационная задача.

Методологические и теоретические основы исследования основаны на фундаментальных трудах в области:

- метода геометрического моделирования, изложенные в работах отечественных ученых Валькова К.И. [13, 14], Голованова Н.Н. [29, 30], Денискина Ю.И. [44], Иванова Г.С. [60, 61], Котова И.И. [74, 75], Михайленко В.Е. [105, 106, 107], Осипова В.А. [127], Полозова В.С. [134], Похвалинского А.Б. [135, 136], Рвачева В.Л. [142, 143], Роткова С.И. [150, 151], Рыжова Н.Н. [153], Стародетко Е.А. [166 - 169], Тевлина А.М. [175], Фролова С.А. [193], Четверухина Н.Ф. [194], Якунина В.И. [195] и др, а также зарубежных Поля де Кательджо, Роберта Фергюсона (Robert Fergusson), Стивена Кунса (Steven Coons), Пьера Безье (Pierre Bézier), Шарля Эрмитта (Charles Hermite), Исаака Шенберга (Isaac Jacob Schoenberg), Карла де Бура (Carl de Boor), Кена Версприла (Ken Versprille), Юджина Ли (Eugene Lee), Стива Гейзберга (Steve Ginsberg) и других.

- методов геометрического моделирования задач освещенности (инсоляции), изложенные в трудах Апресяна А [5], Бахарева Д.В. [9 - 11], Глазкова

А.Ф. [27], Гусева Н.М. [42], Дашкевича Л.Л. [43], Дунаева Б.А. [46, 47], Иванниковой (Ревзиной) Н.В. [62, 148], Колтуна М.М. [67], Куца О.К. [88 - 91], Митрофановой С.А. [112 - 113], Оболенского Н.В. [122], Орловой Л.Н. [124 - 125], Рудницкого А.Н. [152], Суханова И.С. [174], Трембача В.В. [181], Штейнберга А.Я. [185 - 188], Хейфеца А.Л. [189 - 191].

- использования солнечной энергии в космическом пространстве, изложенные в трудах Барабанова Г.В. [8], Ванке В.А. [15], Виссарионова [18], Грилихеса В.А. [39 - 41], Комкова В.А, Мельников В.М. и Харлов Б.Н. [68, 110, 111], Кудрина И.О. [77], Нариманова Е.А. [118], Райкунова Г.Г. [139 - 141], Скребушевского Б.С. [163] и др.

- общей методики автоматизации проектирования, изложенной в трудах Вермишева Ю.Х. [16, 17], Горелика А.Г. [32 - 34], Королева А.Л. [72, 73], Норенкова И.П. [119], Семенкова О.И. [160], Сироты А.А. [163], Падалко С.Н. [168], Прхорова А.Ф. [137], Стояна Ю.Г. [173 - 177], а также ряда зарубежных авторов - Гардана И. (Yvon Gardan) и Люка М. (Michel Lucas) [24], Грувера М. (Mikell P. Groover) и Зиммерса Э. (Emory W. Zimmers) [38], Принса М. [138], Шпура Г. (Gunter Spur) и Краузе Ф. (Frank-Lothar Krause) [189] и других.

- методики автоматизации компоновки авиационной техники, изложенная в трудах Волошина В.В. [21], Гаврилова В.Н. [23], Егера С.М., Лисейцева Н.К и Самойловича О.С. [56], Мальчевского В.В. [102], Осина М.И. [108, 126], Куприкова М.Ю. [1, 44] и др.

- методов дискретного моделирования геометрических объектов в работах Зозулевича Д.М. [25, 26, 52 - 55], Горелика А.Г. [32 - 34], Герасименко Е.П. [25 - 26], Клишина В.В. [67], Корн Г.В. [70 - 72], Локтева М.А. [94, 95], Лоторевича Е.А. [96 - 99], Наджарова К.М. [115 - 117], Ньи Ньи Хтуна [120, 121], Пашенко О.Б. [129 - 131], Ситу Лина [164 - 166], Рогозы Ю.А. [151, 152], Толока А.В [181 - 184], а также ряда иностранных авторов – Гаргантини И. (Gargantini I.) [212, 220, 221], Реквишы А.А.Г., (Requcha A.A.G.) [149] и ряда других.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основании исследования физической, математической и геометрической постановки задачи размещения солнечных батарей КЛА и выбран и обоснован рецепторный метод геометрического моделирования задачи внешней компоновки солнечных антенн КЛА.

2. Разработаны рецепторные геометрические модели описания формы КЛА и солнечных батарей, позволяющих оценить степень затененности обитаемым модулем, так и другими солнечными батареями.

3. Разработаны алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА;

4. Разработаны на языке C# программы реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета.

5. Разработаны методики и алгоритмы и программы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей, основанные на методе сужающейся окрестности.

Практическая значимость и внедрение.

Результаты исследования данной диссертационной работы использованы в практике отработки конструкции КЛА в Научно техническом центре (НТЦ) "Элис" Национального института авиационных технологий (НИАТ), а также в учебном процессе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в курсе для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей (ФПКП) "Инженерное геометрическое моделирование как методологическая основа подготовки специалистов в высокотехнологичных областях промышленности".

Апробация результатов исследования. Результаты проведенных исследований докладывались на следующих международных научных конференциях: конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2014", г. Москва, МАИ, 22-24 апреля 2014; конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2015", г. Москва, МАИ, 21-23 апреля 2015; конф. "Авиация и космонавтика-2015", г. Москва, МАИ, 17-21 июня 2015, конф. "Гагаринские чтения-2017", г. Москва, МАИ, 5-19 апреля 2017; конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2017", г. Москва, МАИ, 20-24 ноября 2017.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. основанные на многозначной логике рецепторные геометрические модели внешней компоновки солнечных батарей КЛА, позволяющие оценить их степень затененности как другими объектами КЛА (например жилыми модулями), так и другими солнечными батареями.

2. Алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА.

3. Программы на языке C# реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета.

4. Методики и алгоритмы и программы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей, основанные на методе сужающейся окрестности.

Публикации по теме диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, из них 3 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 1 - научная монография, опубликованная в международном издательстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 3 глав, основных результатов и выводов, заключения и библиографического списка литературы. Общий объем диссертации составляет 105 страниц, 87 рисунков, 6 таблиц. Библиографический список включает в 289 наименований, в том числе 95 иностранных литературных источников.

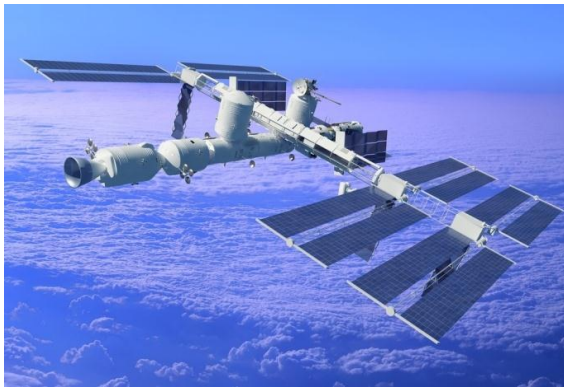
1 АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЗАИМНОГО ЗАТЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

1.1 Анализ особенностей функционирования солнечных батарей на космических летательных аппаратах (КЛА) и на стационарных гелиостанциях

Как уже отмечалось во введении, мощность потока солнечной энергии околоземном пространстве чрезвычайно велика, что объясняет интерес к потенциальным возможностям энергетики, основанной на использовании непосредственного солнечного излучения. 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. Исследования показывают возможность использования солнечной энергии как основной для атмосферных летательных аппаратов [8, 154].

В данном исследовании рассматривается вопрос автоматизации проектирования размещения солнечных батарей на космических летательных аппаратах и солнечных концентраторах при колонизации планет и их спутников (рисунок 1а). Такая же проблема возникает и при проектировании гелиоэлектростанций на земле (рисунок 1б). 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 [1 - 3]. Сразу оговоримся, что речь идет о полях

концентраторов и солнечных батарей летательных аппаратов, не обеспечивающих слежение за изменением положения Солнца.



а)



б)

Рисунок 1.1 - Солнечные батареи в космосе (а) и на земле (б)

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 (рисунок 1.2 а). На КЛА они также будут дополнительно экранироваться самим космическим объектом (рисунок 1.2 б). Поэтому если на определенном объекте солнечных батарей будет мало, то и съем энергии Солнца будет маленьким, если же слишком много – то они будут работать неэффективно, затеняя друг друга.



a)



б)

Рисунок 1.2 - Частичное затенение солнечной батареи КЛА на орбите

Дополнительной трудностью при решении поставленной задачи является то, что геометрическая форма как самих КЛА, так и их солнечных батарей, является чрезвычайно разнообразной, что затрудняет проведение вычислений степени их взаимной затененности. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Простейшее с конструктивной точки зрения линейное расположение солнечных батарей на КЛА Союз (рисунок 1.3 а) может быть продублировано как по длине (на КЛА Росса -

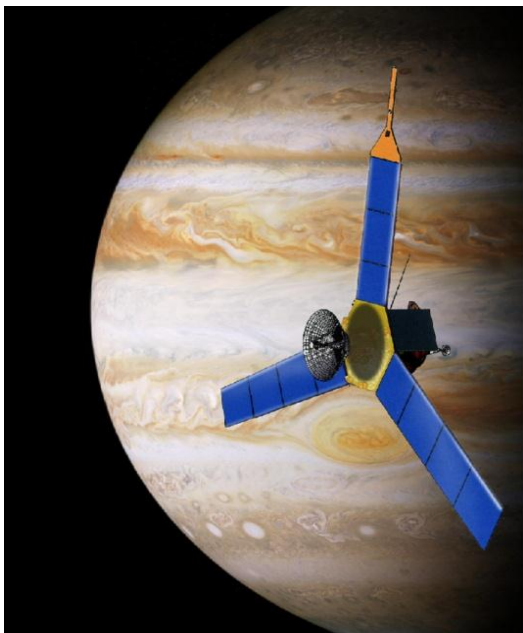
рисунок 1.3 б), так и круговым расположением относительно центральной оси (на КЛА "Джуно" - рисунок 1.3 в). Если на все предыдущих примерах солнечные батареи были установлены неподвижно, то на современных КЛА они могут вращаться относительно своей оси, как на европейском КЛА Марс-экспресс (рисунок 1.3 г). Кроме того, сами солнечные батареи могут располагаться не в плоскости, а под некоторым углом друг относительно друга (рисунок 1.3 д). Рассмотрение еще более экзотических форм солнечных батарей (рисунок 1.3 е) выходит за пределы нашего исследования.



а)



б)



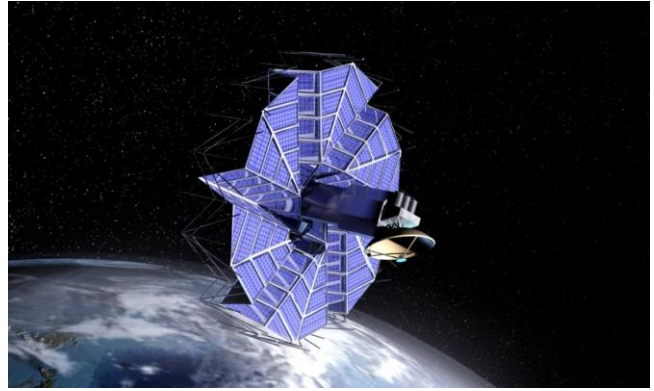
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.3 - Варианты конструктивного выполнения солнечных батарей на КЛА

Проблема взаимного затенения солнечных батарей также присутствует и на стационарных гелиостанциях. В отличие от КЛА солнечные батареи на них принято называть гелиостатами. На рисунке 1.4 *а* видно, что отбрасываемая гелиостатом тень частично экранирует гелиостаты следующего ряда, снижая эффективность их работы. Для предотвращения взаимного затенения гелиостатов их размещают на достаточно больших расстояниях друг от друга (рисунок 1.4 *б*). Однако такая плата за отсутствие взаимного затенения приводит к тому, что для размещения мощной гелиостанции требуются сравнительно большие участки земли. Так самая большая в мире солнечная станция Камути, мощностью 648 МВт, расположенная в Индии вблизи города Тамил-Наду, потребовала для размещения 2,5 миллионов гелиостатов 10,36 квадратных километров земли (рисунок 1.4 *в*).



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 - Стационарные солнечные электростанции

Эффект взаимного затенения может быть уменьшен при использовании гелиостатов, отслеживающих положение Солнца (рисунок 1.5). Однако в современной технике они не получили широкого распространения из-за их высокой стоимости и того (обусловленный необходимостью присутствия в них датчиков поло-

жения Солнца и решающих модулей), что значительный процент вырабатываемой ими электроэнергии тратится на их собственные нужды.



а)



б)

Рисунок 1.5 - Гелиостат, отслеживающий положение Солнца (а) и углы его поворота (б)

Имеются исследования о возможности создания самолетов, работающих исключительно на солнечной энергии [154], но моделирование затенения таких солнечных батарей выходит за рамки настоящего исследования.

1.2 Математическая постановка задачи компоновки солнечных батарей на КЛА

Для формулирования критериев эффективности решаемой задачи 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) Ω , 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 Ω 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

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

Из этого выражения следует, что максимум энергии должен быть получен при дополнительных ограничениях – варианте X размещения гелиостатов в области допустимых решений Ω 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 Ω 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 $\text{Max } P_\Sigma$ в определенное время t_0 . Это запишется выражением

$$\underset{P_x \rightarrow \min}{\text{Max}}_{t_0} P_{\Sigma}(t) \text{ for } X \subset \Omega.$$

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 1.6 а). Тогда со стороны потока солнечной энергии (направления W) КЛА будет виден как некоторая аксонометрическая проекция (рисунок 1.6 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 $S' \rightarrow \max$.

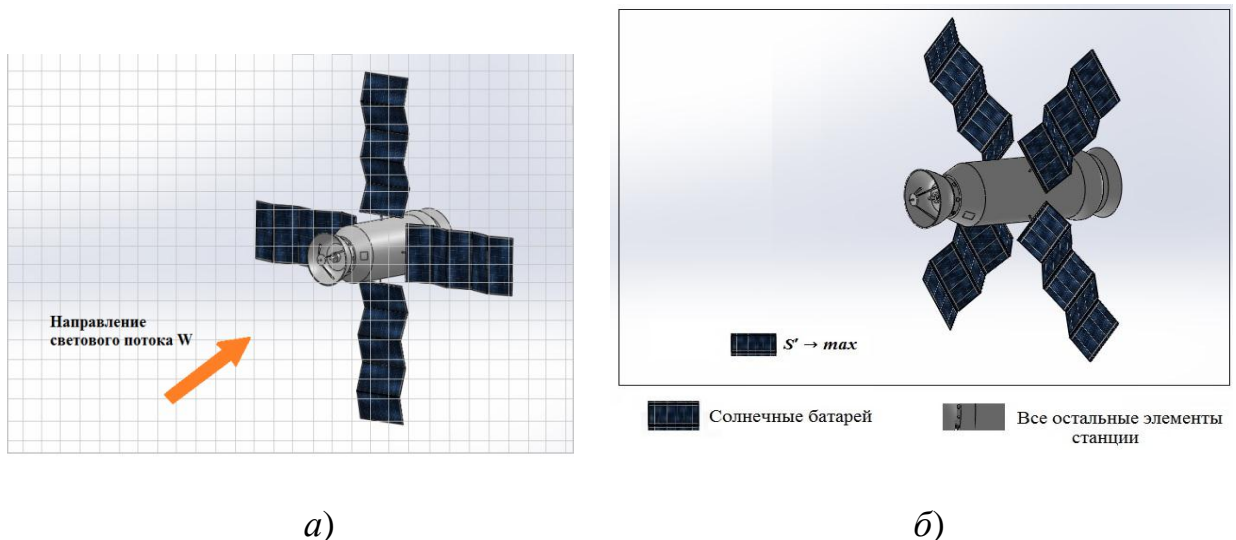


Рисунок 1.6 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (б)

1.3 Геометрические модели оценки взаимного затенения объектов

Задача оценки взаимного затенения объектов в пространстве являются традиционными в строительстве и архитектуре (задачи инсоляции). Под *инсоляцией* (от латинского *in solo* – выставляю на солнце) в технике принято понимать облучение поверхностей солнечным светом (солнечной радиацией). При этом принято, что облучение поверхности или пространства производится *параллельным пучком лучей*, поступающих с направления, в котором виден в данный момент центр солнечного диска. Термин "инсоляция" используется в основном в эргономике, архитектуре и строительной светотехнике.

Инсоляция является физической величиной, под которой понимается общее количество энергии, собранной на определенной площади в пределах данного времени. Этим она отличается от такого технического параметра, как *освещенность*. Значение освещенности в идеале - это мгновенное измерение интенсивности света. В то время как освещенность обозначает мгновенное значение доставленной на поверхность солнечной энергии, инсоляция обозначает накопленную сумму всей энергии падающего на поверхность в течение определенного интервала времени. Этот интервал должен быть указан для того, чтобы понять, а типичными единицами измерения времени являются день или час (например, кВт ч / м² в день).

Стоит отметить, что нормированию и расчёту инсоляции сейчас уделяется очень большое внимание. С переходом землепользования и строительства на рыночную основу санитарные нормы инсоляции жилищ стали главным фактором, сдерживающим стремления инвесторов, владельцев и арендаторов земельных участков к переуплотнению городской застройки с целью получения максимальной прибыли. Современное состояние санитарно-гигиенического нормирования и расчета инсоляции определяют введенные в 2002 г. СанПиН 2.2.1/2.1.1. 1076-01 "Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий".

Возможность максимального съема энергии падающего солнечного потока определяется не только мощностью самого светового потока, но углом наклона между потоком энергии и принимающей поверхностью (рисунок 1.7). Очевидно, что максимальную мощность падающего светового потока может быть снята с поглощающей поверхности, перпендикулярной направлению светового потока. На рисунке 1.7 видно, что "уход" от перпендикулярности принимающей поверхности равносильно снижению площади падающего потока световой энергии.

Путем анализа литературных источников показано, что используемые в настоящее время все методы инсоляционных расчетов принято делить на две группы – геометрические и энергетические [6, 9, 64, 174]. С помощью геометрических методов можно определить продолжительность инсоляции или затенения участка, помещения или отдельной точки, характер перемещения солнечных лучей и т.п.

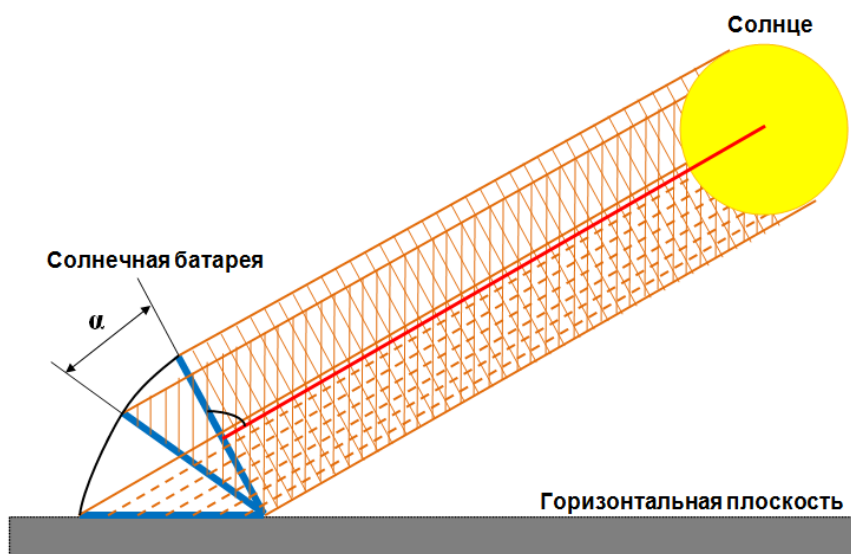
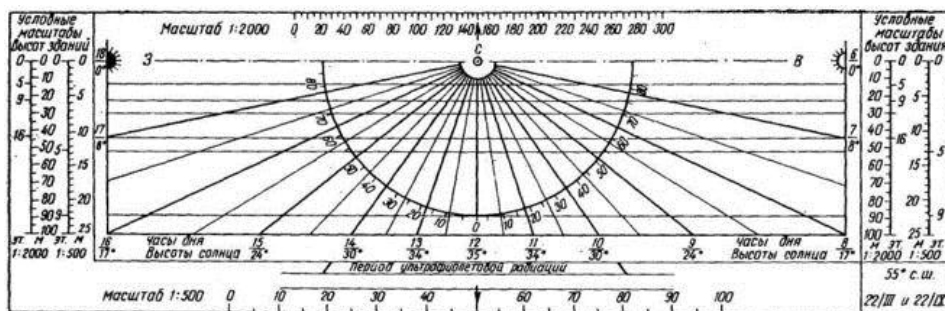


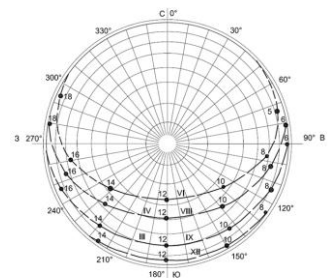
Рисунок 1.7 - Наклон модуль входящего света снижает выход модуля

Литературный обзор развития методологии расчета инсоляции от Витрувия (1 в. н.э.) до конца прошлого столетия приведен в работах [43, 46, 47, 113]. Разработка методов решения этих задач, не выходящих за рамки классических разделов

математики и физики, в основном была завершена в 70 гг. прошлого столетия. В эти годы трудами ряда советских ученых (Д.В. Бахарев, Х.А. Беккет, Б.А. Дунаев, Г. Плейжел, Г. Марти, Д.С. Масленников, Н.В. Оболенский, А.М. Рудницкий, М. Тваровский, В.Т. Шимко) были систематизированы методы пространственно-временного расчета инсоляции и учета экранирования. Они были классифицированы по геометрическому признаку на метод центрального, ортогонального и ко-соугольного проецирования. Для ручного расчета оптимальным был выбран и рекомендован в нашей стране метод ортогонального проецирования. Этот метод ручного расчета по номограммам и сегодня используется, являясь нормативно установленным для проектировщиков. Вершиной такого подхода, по нашему мнению, можно считать изданную в 1975 году монографию [185], в которой описаны основные методы расчетов инсоляции - как оптимально разместить на генплане здания с учетом требований инсоляции. В приведена масса примеров расчетов инсоляции для различных типов зданий, также имеются рекомендации по изготовлению "инсоляционной линейки" и "солнечного транспортира" (рисунок 1.8), которые, являясь средствами механизации, помогают производить расчеты инсоляции самостоятельно. Как отмечено в литературе, точность ручных расчетов невелика.



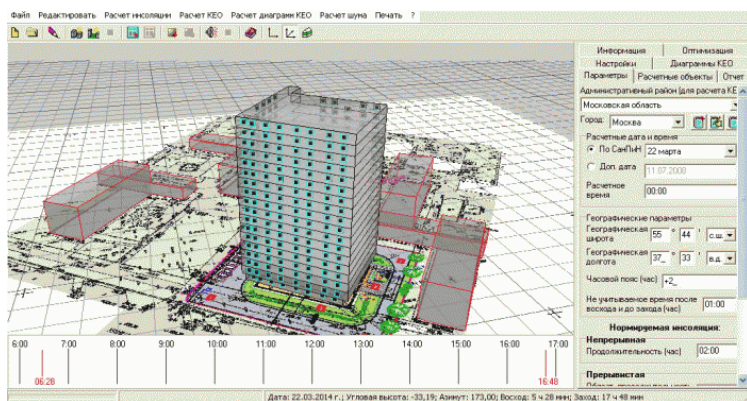
а)



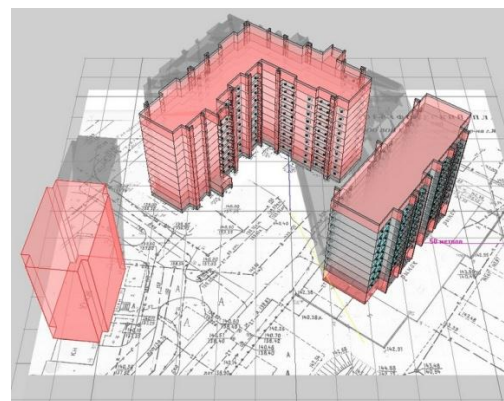
б)

Рисунок 1.8 - Средства механизации инсоляционных расчетов - инсоляционная линейка (а) и солнечный транспортер (б) Дунаева Б.А.

Ручной способ расчета продолжительности инсоляции, представленный в нормативных документах, конечно же устарел в XXI веке информационных технологий. Однако используемый в этом расчете метод начертательной геометрии положен в основу современных компьютерных алгоритмов. Жесткая конкуренция на рынке проектных услуг заставила проектировщиков в кратчайшие сроки освоить компьютерные методы архитектурно-строительного проектирования. В настоящее время созданы алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие рассчитывать любые характеристики инсоляции. Пример интерфейса такой программы приведен на рисунке 1.9. Перед использованием такой программы необходимо осуществить моделирование сцены в одной из систем компьютерной графики. В Интернете представлены отечественная компьютерная программа расчета инсоляции СОЛЯРИС, LARA_02 "Программа расчета инсоляции и естественного освещения" и японская программа MicroShadow for ArchiCAD, реализующая ручной метод ортогонального проецирования. Такой подход использован и в других известных нам работах Грилихеса В.А., Хейфеца А.Л. и ряда других ученых-геометров. Методы этой группы основаны на использовании аппарата 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. Соответствующие алгоритмы были написаны на языке AutoLISP как программное приложение к пакету AutoCAD для автоматизации расчета продолжительности инсоляции. По примерно такой же траектории движется солнце и в космических поселениях. Что же касается КЛА, то положение Солнца (как источника энергии) однозначно описывается тремя углами Эйлера в системе координат КЛА (в соответствии с ГОСТ 20058-80).



а)



б)

Рисунок 1.9 - Пример интерфейса (а) и результатов работы (б) компьютерной программы расчета инсоляции зданий

Энергетические же методы, разработанные в трудах Штейнберга А.Я., Гусева Н.М. и др. 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. Проводимые таким образом расчеты инсоляции позволяют определить плотность потока, создаваемую им облучённость и экспозицию в лучистых или эффективных (световых, бактерицидных и др.) единицах измерения.

Общим в обоих методах расчета инсоляции является то, что для описание затеняющих объектов (как правило, это коробки зданий) не требуется высокой точности и детализации.

1.4 Основные виды геометрических моделей космических летательных аппаратов (КЛА)

Теоретические вопросы метода геометрического моделирования с различных аспектов исследовались в трудах отечественных ученых Валькова К.И. [19], Денискина Ю.И. [39, 40], Иванова Г.С. [63, 64, 65], Котова И.И. [77, 78], Михай-

ленко В.Е. [103, 104, 105], Осипова В.А. [131, 132], Полозова В.С. [80, 141], Похвалинского А.Б. [144, 145], Рвачева В.Л. [150, 151], Рыжова Н.Н. [158, 159, 160], Стародетко Е.А. [177, 178, 179, 180], Фролова С.А. [196], Якунина В.И. [204, 205, 206] и др, а также зарубежных Поля де Кательджо, Роберта Фергюсона (Robert Fergusson), Стивена Кунса (Steven Coons), Пьера Безье (Pierre Bézier), Шарля Эрмитта (Charles Hermite), Исаака Шенберга (Isaac Jacob Schoenberg), Карла де Бура (Carl de Boor), Кена Версприла (Ken Versprille), Юджина Ли (Eugene Lee), Стива Гейзберга (Steve Ginsberg) и других. В их трудах содержатся как классические, так и компьютерно - ориентированные методы задания, расчета и воспроизведения геометрических форм.

Природные и технические объекты чрезвычайно разнообразны по своей геометрической форме, поэтому известны различные подходы к их классификации. Нам представляется наиболее рациональным для решения технических задач классификатор геометрических объектов, предложенный Семеновым О.И. – Осиповым В.А. [165, 166, 132, 164, 165], в основе которого лежит структура синтеза геометрических объектов из составляющих их элементов. Этот классификатор подразделяет все геометрические объекты (ГО) на две большие группы – геометрические объекты сложной технической формы и геометрические объекты сложной технической структуры. Объекты первой группы ограничиваются отсеками поверхностей, каждая из которых описана достаточно сложными аналитическими зависимостями. Объекты второй группы представляют собой объединенные на основе теоретико-множественных операций (объединение, пересечение, отрицание) ГО, как правило, относительно простых геометрических форм. В некоторых трудах по геометрическим моделям [2, 74] исходя из специфики решаемых задач количество таких групп увеличено до четырех (рисунок 1.10).

Другим подходом к классификации геометрических моделей является их разделение по информационной насыщенности объекта (рисунок 1.11). Она отражает точность описания геометрического объекта (только по ребрам, по сечениям, по всей поверхности, по всему телу). Очевидно, что любое увеличение точности

описания (информационной насыщенности) приводит к увеличению сложности математического описания и его компьютерной реализации.

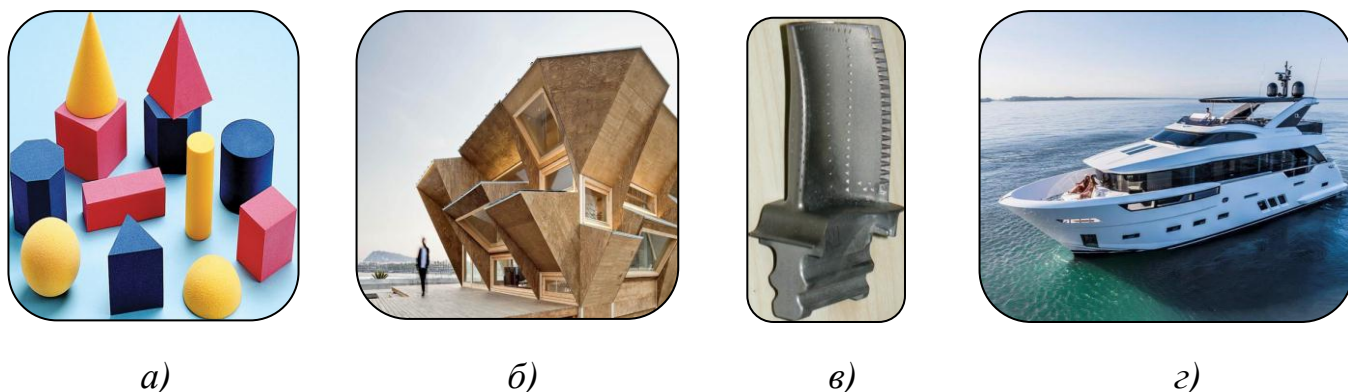


Рисунок 1.10 – Классификация геометрических объектов по уровню сложности: *а* – примитивы; *б* – объекты сложных технических структур; *в* – объекты сложных технических форм; *г* – объекты сложных технических форм и структур

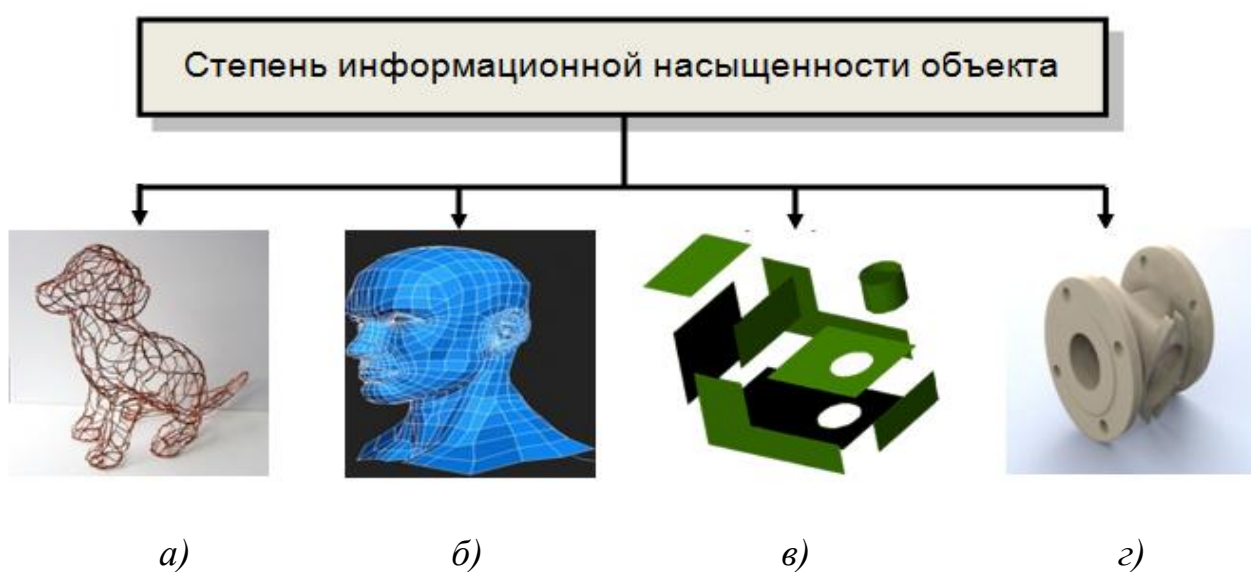


Рисунок 1.11 – Классификация геометрических моделей по информационной насыщенности: *а* - проволочная, *б* - каркасно-поверхностная, *в* - поверхностная, *г* - твердотельная

Классификацию же самих методов геометрического моделирования принято разделять на три класса (рисунок 1.12).

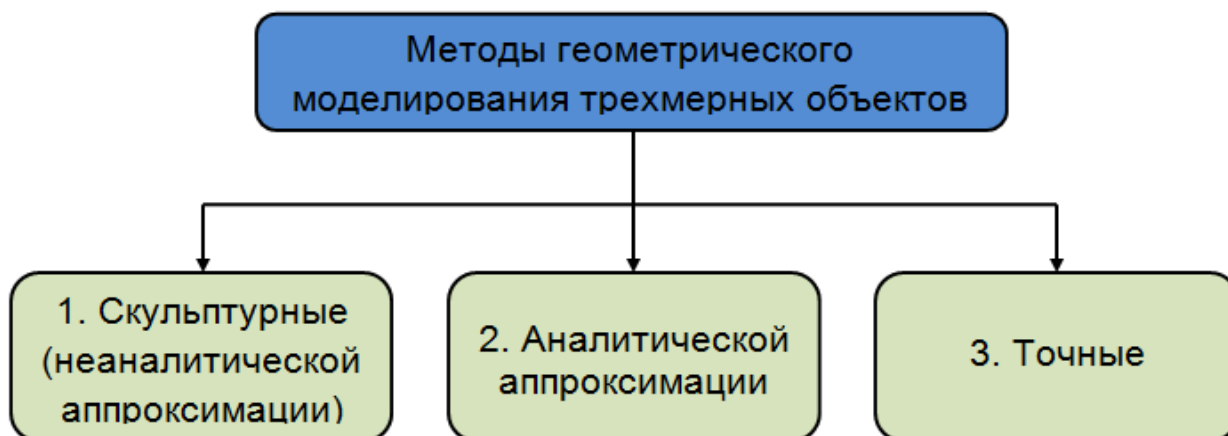


Рисунок 1.12 – Классификация методов моделирования геометрических объектов

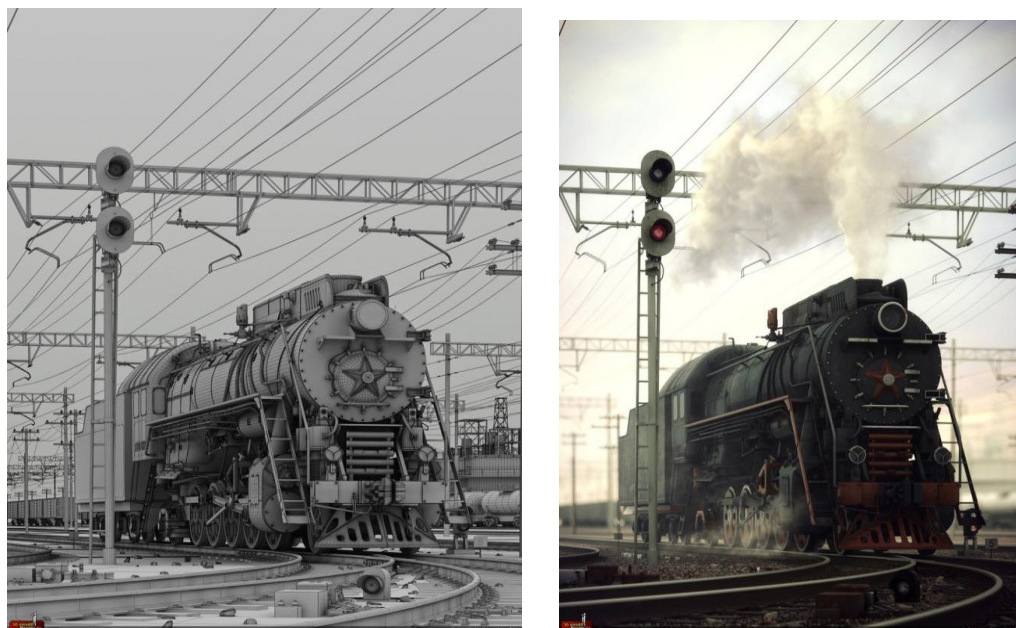
Скульптурные методы используются для создания геометрических моделей таких объектов, точное аналитическое описание которых неизвестно и вряд ли может быть получено. Название "скульптурные" обусловлено тем, что создавая такие модели проектант чаще всего руководствуется эстетическими соображениями (рисунок 1.13). Помимо дизайна скульптурные методы широко применяются и в технике (авиа-, судо- и автостроении), когда форма поверхности корректируется не только по эстетическим соображениям, но и на основании данных аэродинамического или гидродинамического эксперимента. Однако в итоге мы должны получить аналитическое выражение геометрической формы этих объектов с той или иной степенью точности для использования CAD\CAM\CAE - систем, без которых немислимо современное производство.

Перезадание скульптурной поверхности в форму, обеспечивающую ее аналитическое описание, основано на довольно многочисленной библиотеке методов аппроксимации поверхностей с использованием сплайнов, В-сплайнов, NURBS, поверхностей Кунса, Эрмита, Лагранжа, Безье и т.п.



Рисунок 1.13 – Пример работы дизайнера над объектом скульптурной поверхности

Методы аналитической аппроксимации используются для описания формы объектов, состоящих из сложных поверхностей второго и более высоких порядков. Поскольку прямая вычислительная обработка поверхностей столь сложной геометрической формы затруднена, они аппроксимируются участками поверхностей более низкого порядка (плоскостями, цилиндрами, сферами и т.п.). На рисунке 1.14 *а* видно, что сцена с объектами как простой, так и сложной геометрической формы на внутримашинном уровне была переопределена отсеками плоскостей (фасетами). На рисунке 14 *б* видно, что представление сцены многими миллионами фасет не помешало получить на выходе фотореалистичное изображение сцены, хотя, по-видимому, не обошлось и без последующей обработке изображения в графическом редакторе (типа Фотошопа). Стоит отметить, что в современной вычислительной технике в процессе обсчета сцены задействованы мощности и видеокарты, а сам процесс обсчета и визуализации даже на очень мощных компьютерах может занимать десятки и сотни часов.



а)

б)

Рисунок 1.12 – Пример сцены, полученной методом аналитической аппроксимации (а) с ее последующей визуализацией (б)

Точные методы моделирования трехмерных объектов представляют собой совокупность следующих известных методов:

- Кинематического;
- Параметрического;
- Проволочно-каркасного;
- Кусочно - аналитического;
- Алгебро-логического (метод R-функций);
- Метод “разложения на элементы”;
- Метод конструктивной геометрии элементарных объемов.

Выбор конкретного метода геометрического моделирования должен быть обусловлен спецификой решаемой задачи. Так как целью нашего исследования является моделирование затененности солнечных батарей КЛА, то для описания формы КЛА нам нет необходимости использовать "прожорливые" скульптурно-аналитические методы. Это обусловлено спецификой полета КЛА в безвоздушном пространстве, где они не испытывают сопротивления воздуха и не нуждаются

в подъемной силе, создаваемой при движении аэродинамически спрофелированными поверхностями. Действительно, на рисунке 1.3 было видно, что форма различных КЛА представляет собой композицию примитивов различного типа, что позволит использовать для решения практических задач точные методы моделирования. Обоснованию выбора конкретного метода из представленного выше списка будет посвящен следующий раздел.

Заключение и выводы по разделу 1

Проведенный анализ научной литературы позволяет сделать следующие выводы:

1. Солнечная энергия зачастую является единственной доступной энергии для обеспечения длительного функционирования КЛА на орбите.
2. Насыщенность современных КЛА энергооборудованием, что требует для обеспечения их функционирования солнечных батарей большой площади.
3. Применение современных методов геометрического моделирования и информационных технологий позволяет аналитически описать объекты сколь угодно сложных геометрических форм, в том числе и КЛА с солнечными батареями различной формы, размеров и расположения относительно корпуса КЛА.
4. Вопросы расчетов взаимного затенения объектов (инсоляции) решены лишь для архитектурно-строительных задач. Решение таких задач осуществляется как с помощью средств механизации (солнечные линейки), так и посредством компьютерных программ.
6. Задача оптимизации размещения солнечных батарей на КЛА с математической точки зрения может быть описана как задача математического программирования.

2 РЕЦЕПТОРНЫЕ МОДЕЛИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ЗАТЕНЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КЛА

2.1 Сущность рецепторного метода геометрического моделирования

Для решения поставленной задачи определения степени взаимного затенения солнечных батарей КЛА нам представляется целесообразным выбор геометрических моделей, дискретизирующих расчетное пространство. Известно, что наиболее точным формальным описанием трехмерного объекта, как геометрического тела, является отождествление его с занимаемой им областью пространства (точечным множеством). Однако в такой постановке проблему формирования геометрического объекта (ГО) можно рассматривать только теоретически. Использовать же эту концепцию на практике можно, если в качестве исходного элемента множества (E^3) принять не бесконечно малую точку, а, например, куб с размерами $(l \times l \times l)$. При этом должно выполняться условие конгруэнтности всех кубиков, заполняющих пространство E^3 , и любые два кубика не должны иметь общих внутренних точек. Внешне рецепторная матрица напоминает всем хорошо известный кубик Рубика (рисунок 2.1 а). Однако в отличие от кубика Рубика, имеющего достаточно сложную конструкцию, обеспечивающую вращение каждого элемента кубика по каждой из осей, рецепторы в рецепторной матрице полностью независимы друг от друга (рисунок 2.1 б).

Пространство E^3 в этом случае называется *дискретным* или *рецепторным*, а геометрическая модель, формируемая в таком пространстве, соответственно *дискретной* или *рецепторной моделью*.

Англоязычным аналогом термина "рецептор", используемым в зарубежной научной литературе, является слово "Воксель" - "voxel" (аббревиатура от слов "VOlumatic" и "piXEL"), т.е. трехмерный пиксель. Следует отметить, что в настоящее время и в русскоязычной литературе все чаще используется это слово [178-181]. Однако мы в данном исследовании будем использовать русскоязычный термин "рецептер", впервые введенный Зозулевым Д.М. [52-55]. В литературе ре-

цепторный метод имеет и другие названия («матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.).

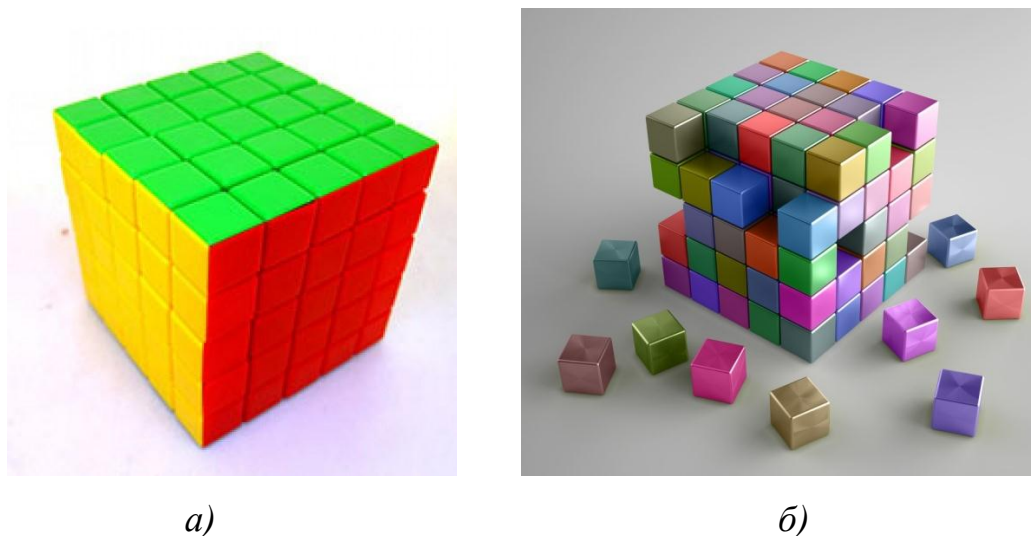
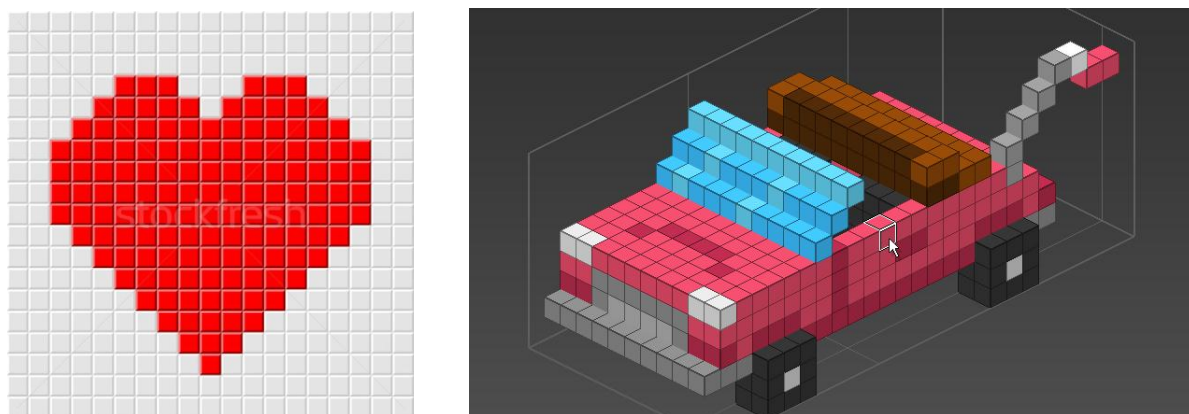


Рисунок 2.1 - Кубик Рубика как аналог рецепторной матрицы (а) и независимость элементов кубика (б)

В основу рецепторного метода 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 2.2 а). Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $m \times n \times p$ (рисунок 2.2 б).



а)

б)

Рисунок 2.3 - Рецепторная модель 2D-тела (а) и 3D-тела (б)

Очевидно, что точность описания геометрической формы объекта зависит от выбранной нами дискретности рецепторной матрицы. Рецепторный метод геометрического моделирования был предложен в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым Зозулевичем Д.М., но в те он годы не получил распространения из ограниченных возможностей ЭВМ по памяти и быстродействию. Хотя им и коллективом его сотрудников и были решены этим методом отдельные прикладные задачи, на ЭВМ тех лет с 16-битной архитектурой и объемом оперативной памяти 32...128 килобайт было невозможно рассчитывать на эффективное использование рецепторных моделей.

В дальнейшем, в связи с развитием производительности вычислительной техники, рецепторные геометрические модели нашли свое практическое применение. Исследование и разработка рецепторных геометрических моделей для различных случаев применения была проведена в работах отечественных ученых Горелика А.Г. [32-34], Герасименко Е.П. [25-26], Клишина В.В. [66], Корн Г.В. [69-71], Локтева М.А. [94-95], Лоторевича Е.А. [96-99], Ньи Ньи Хтуна [120 -121], Пашенко О.Б. [129-131], Рогозы Ю.А. [147-148], Ситу Лина [160-162], Толока А.В. [178-181], а также ряда иностранных авторов – Гаргантини И. (Gargantini I.), Реквишы А.А.Г., (Requcha A.A.G.) и ряда других.

Здесь же следует отметить очень близкие по своему подходу исследования

Наджарова К.М. [116, 117], Роткова С.И. [150,151] и др., в которых в качестве элементарного объекта формы выступает не классический рецептор в виде куба или параллелепипеда, а более сложные фигуры – например гексоэксаэдр.

Подводя итог вышесказанному, нами предлагается использовать для решения поставленной задачи рецепторные геометрические модели, т.е. разбиение компоновочного пространства на отдельные области в виде параллелепипедов, для каждой из которых в памяти компьютера присваивается значение «0» если она является свободной от размещенных объектов и доступна для размещения и «1» - если область уже занята размещенным объектом или коммуникацией к нему. Этот метод, сравнивая значения рецепторов, позволяет легко определять пересечение объектов.

По своей геометрической сущности рецепторный метод, который в данной диссертации используется для решения поставленной задачи, является частным случаем метода аналитической аппроксимации объектов, который используются для описания трехмерных объектов, включающих сложные поверхности второго и более высоких порядков. Поскольку вычислительная обработка таких поверхностей затруднена, они аппроксимируются участками поверхностей более низкого порядка (плоскостями, цилиндрами и т.п.).

Рецепторный метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. К очевидным недостаткам следует отнести дискретность модели и потребность в больших объемах компьютерной памяти для своей реализации, но сейчас увеличение этой памяти до любых объемов не представляет сложности ни технической, ни экономической. Принципиальным недостатком рецепторной модели является невозможность исследования инженерно-дифференциальных характеристик поверхности объекта (рисунок 2.4 *а*). Впрочем это не мешает создавать из кубиков вполне узнаваемые объекты сложных технических форм (рисунок 2.4 *б*).



Рисунок 2.4 - Рецепторная модели достаточно сложных по форме геометрических объектов

Другой сложностью использования рецепторных геометрических моделей (РГМ) является то, что они никогда не являются изначальными. Исходные объекты, с которыми работает конструктор, являются, как правило, параметрическими геометрическими моделями (т.е. задающими вид объекта и его параметры - сфера радиусом R , параллелепипед размерами $a \times b \times c$ и т.д.). Проектант работает с параметрической моделью, содержащей описание вида примитива и значения его основных параметров, что легко определяется из чертежа. Именно по этому принципу работают все современные системы геометрического моделирования (рисунок 2.5). Описание параметрической модели имеет вид $P=f(\delta, \tau)$,

где δ - постоянная часть описания (задание типа примитива);

τ - переменная часть описания (задание размеров примитива)

Таким образом, рецепторную модель можно рассматривать исключительно как «внутримашинную». Поэтому возникает необходимость в дополнительном программном модуле «Параметрическая модель» \leftrightarrow «Рецепторная модель». Вопросы такого преобразования решены в работах Г.В.Корн [69-71], Ньи Ньи Хтуна [120,121] и Ситу Лина [160-162]. Однако анализ этих работ показывает, что каждый из этих авторов осуществлял такое преобразование в соответствии со своими задачами исследования, т.е. решал эту проблему "под себя". Поэтому общие ме-

тоды преобразования «Параметрическая модель» ↔ «Рецепторная модель» нам неизвестны.

Таким образом, для эффективного использования рецепторных моделей, необходимо организовать прямой и обратный переходы "Рецепторная модель" ↔ "Параметрическая модель". Таким образом, рецепторную модель можно рассматривать как «внутримашинную», требующую ввода и вывода информации в виде параметрических моделей.

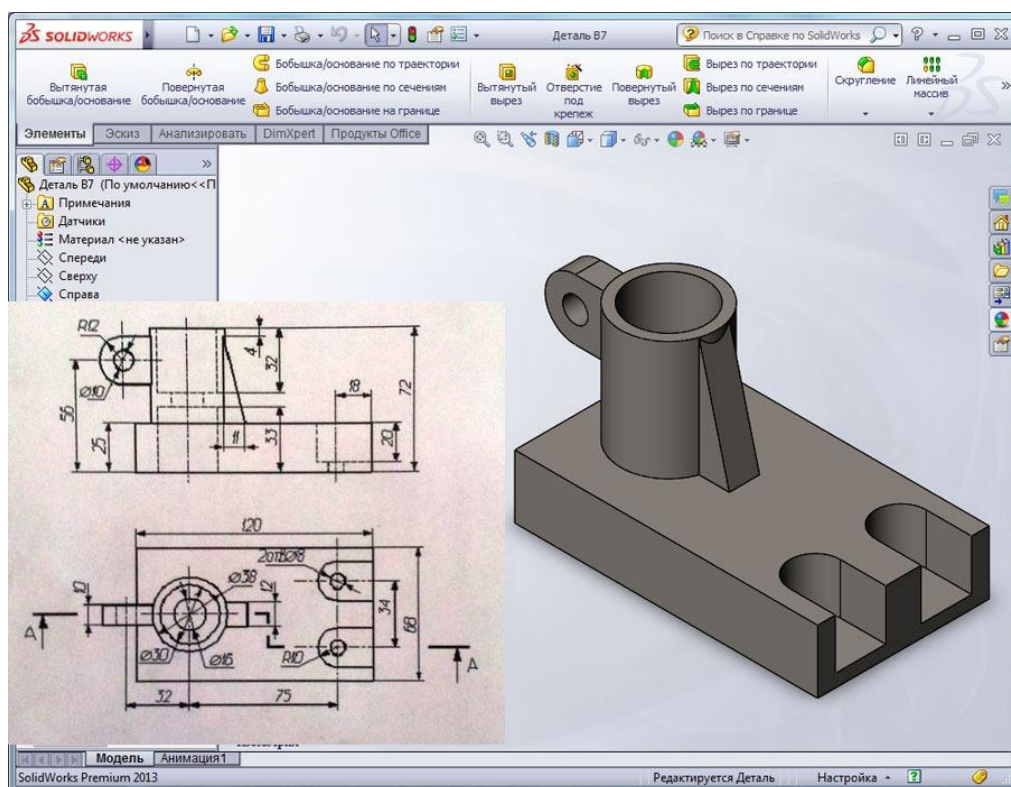


Рисунок 2.5 - Твердотельное моделирование в CAD - системе по ее параметрическому описанию в виде чертежа

Очевидно, что примитивы, имеющие простые параметрические модели, не исчерпывают все богатство форм компокуемых объектов современной авиационной техники, но по литературным данным [23] форму 98% компокуемого приборного оборудования можно описать как примитивы или композиция примитивов.

Безусловным же достоинством РГМ является уникальная легкость определения условия взаимного непересечения (УВН) уже размещенных объектов – если значение конкретного рецептора «0», то он доступен для размещения, если «1» -

то он уже кем-то «занят». Именно эти причины побудили в последние годы интерес к РГМ как в соседних странах, так и на Западе (где они называются «воксельными»). Также легко решаются задачи определения объемов и сечений заданными плоскостями.

2.2 Использование рецепторного метода геометрического моделирования для оценки степени затененности солнечных батарей КЛА

Рецепторные геометрические модели не требуют для своей реализации сложных формул или логических построений. Однако их практическая реализация обладает своей, специфической сложностью. Помимо необходимости преобразования исходной параметрической модели, заданной конструктором, в рецепторную, она обусловлена необходимостью учета положения и значения каждого рецептора (из многих миллионов в рецепторной матрице), а также создания механизма визуализации полученных результатов.

Исходной информацией для формирования рецепторной матрицы является параметрическая модель КЛА (рисунок 2.6 *а*), содержащая сведения как о типе геометрического примитива, так и его размерах. Эти данные заносятся в таблицу исходных данных 2.1. Особенностью нашего подхода является то, что мы будем использовать в расчетах не классическую рецепторную матрицу (заполненную "0" и "1"), а многозначную, в которую добавлены дополнительные коды. Конкретно она будет трехзначной – «0» - свободное пространство, «1» - пространство, занятое космической станцией, «2» - пространство, занятое солнечными батареями (рисунок 2.6 *б*).

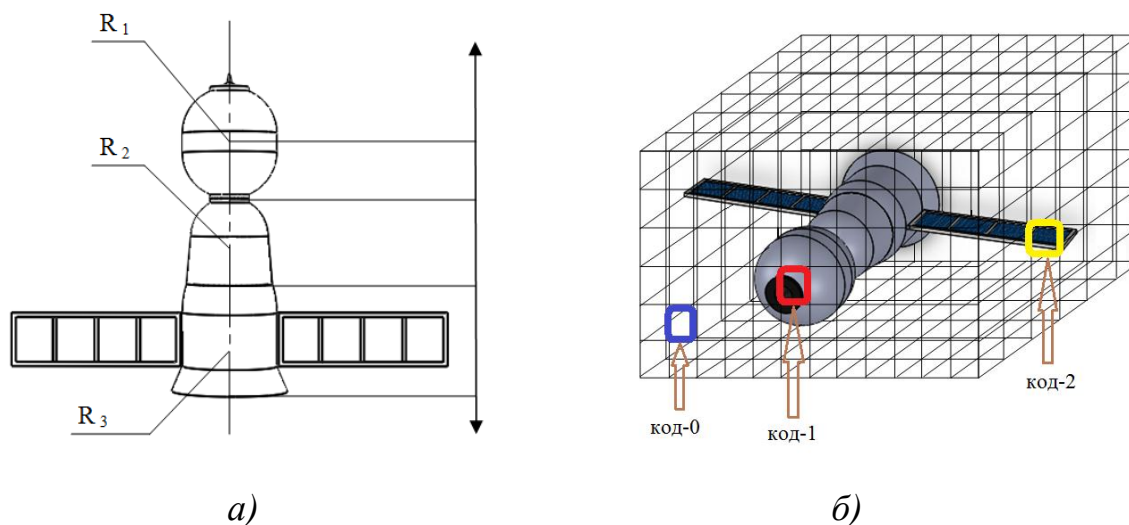


Рисунок 2.6 - Представление КЛИА рецепторной матрицей: *а* - параметрическая модель КЛИА; *б* - представление КЛИА многозначной рецепторной матрицей

Таблица 2.1 - Таблица исходных данных, определяющих внешнюю геометрическую форму КЛИА

Вид примитива	Код объекта	Координаты расположения			Углы поворота			Размеры				
		X	Y	Z	α	β	γ	r1	r2	r3	r4	r5
Сфера	1 (сама станция)	10 см	15 см	10 см	0	0	35	50	-	-	-	-
Прямой круговой конус-1	1 (сама станция)	40 см	50 см	40 см	0	0	45	70	100	130	-	-
Цилиндр-1	1 (сама станция)	70 см	70 см	80 см	53	0	0	150	200	-	-	-
Прямой круговой конус-1	1 (сама станция)	50 см	50 см	60 см	0	0	70	200	250	300	-	-
Цилиндр-1	1 (сама станция)	75 см	65 см	70 см	75	0	0	300	400	-	-	-
Прямоугольник	2 (Солн- батарея)	220 см	150 см	10 см	0	0	40	-	-	-	395	-

Итак, мы преобразовали геометрическое описание КЛИА (вместе с солнечными батареями) из параметрической формы в рецепторную. При этом направление координатных осей КЛИА совпадают с координатными осями рецепторной матрицы. Если направление солнечного потока W также совпадает с осями КЛИА (и рецепторной матрицы), то это наиболее благоприятный для нас расчетный случай. В этом случае направление W будет ортогонально рецепторной матрице (рисунок 2.7).

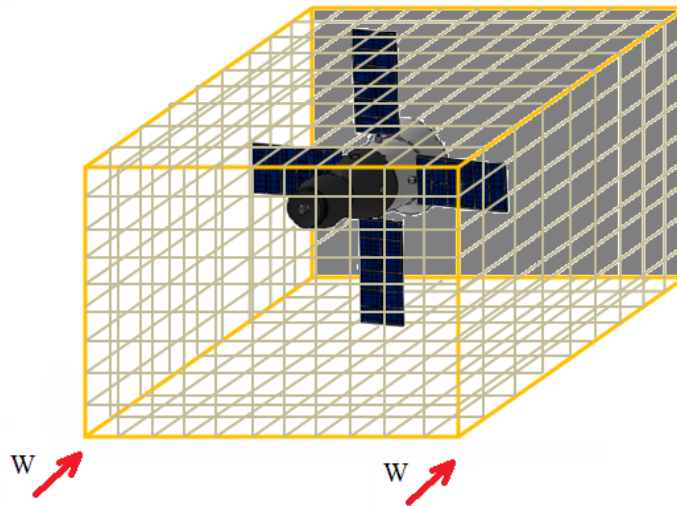


Рисунок 2.7 - Рецепторная матрица с КЛА при ортогональном направлении потока энергии W

Как было отмечено выше, в нашем исследовании мы используем не классическую рецепторную матрицу (заполненную кодами "0" и "1"), а трехзначную, в которую добавлены дополнительные коды «2» - пространство, занятое солнечными батареями (рисунок 2.8 а). Поэтому КЛА будет представлен в рецепторной матрице кодами, показанными на рисунке 2.8 б. Срез полученной таким образом рецепторной матрицы представлен на рисунке 2.9.

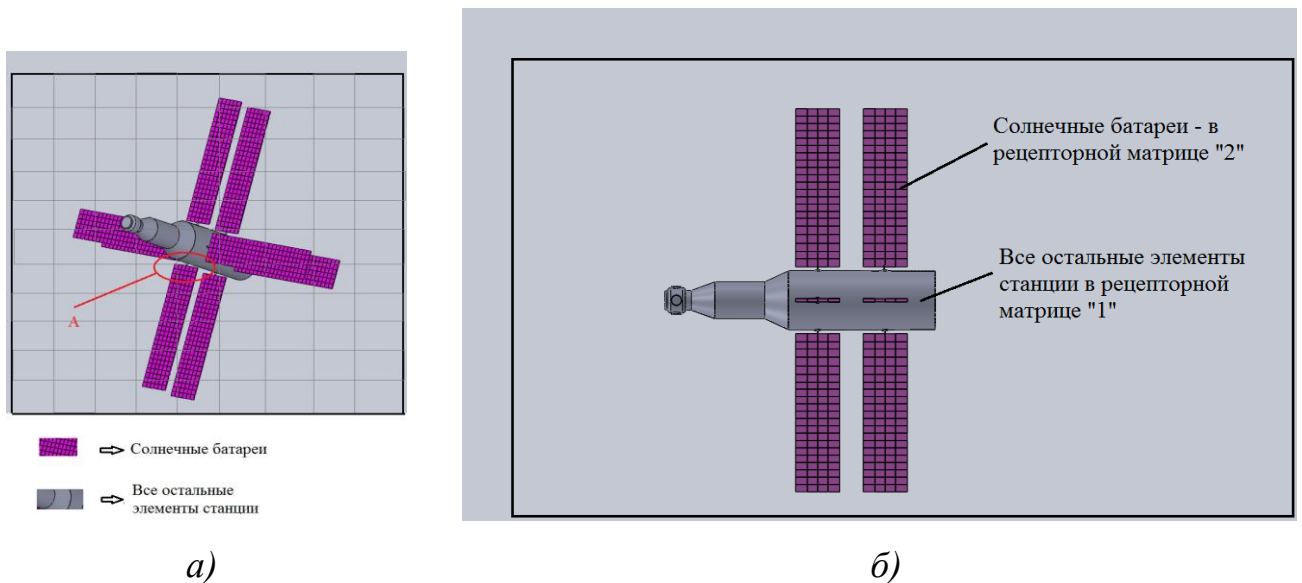


Рисунок 2.8 - Представление КЛА многозначной рецепторной матрицей

На рисунке 2.11 *а* видно, что на каждом срезе мы можем каждому конкретному рецептору поставить в соответствие либо "1" (если он совпадает с корпусом КЛА), либо "2" (если он совпадает с солнечными батареями). Если совпадения с какими-либо элементами КЛА нет, то значение рецептора на срезе остается первоначально заданным значением "0". Посмотрев на однослойный срез рецепторной матрицы со стороны направления потока энергии W (рисунок 2.11 *б*) мы видим заполненный конкретными данными слой, что позволяет подсчитать суммарную площадь свободного пространства (по количеству "0"), суммарную площадь, занимаемую обитаемыми модулями КЛА (по количеству "1") и, что самое интересное для нас - суммарную площадь солнечных батарей (по количеству "2"). Однако все это только в конкретной плоскости среза рецепторной матрицы. Учет всей эффективной площади солнечных батарей КЛА по всем срезам рецепторной матрицы будет показан ниже.

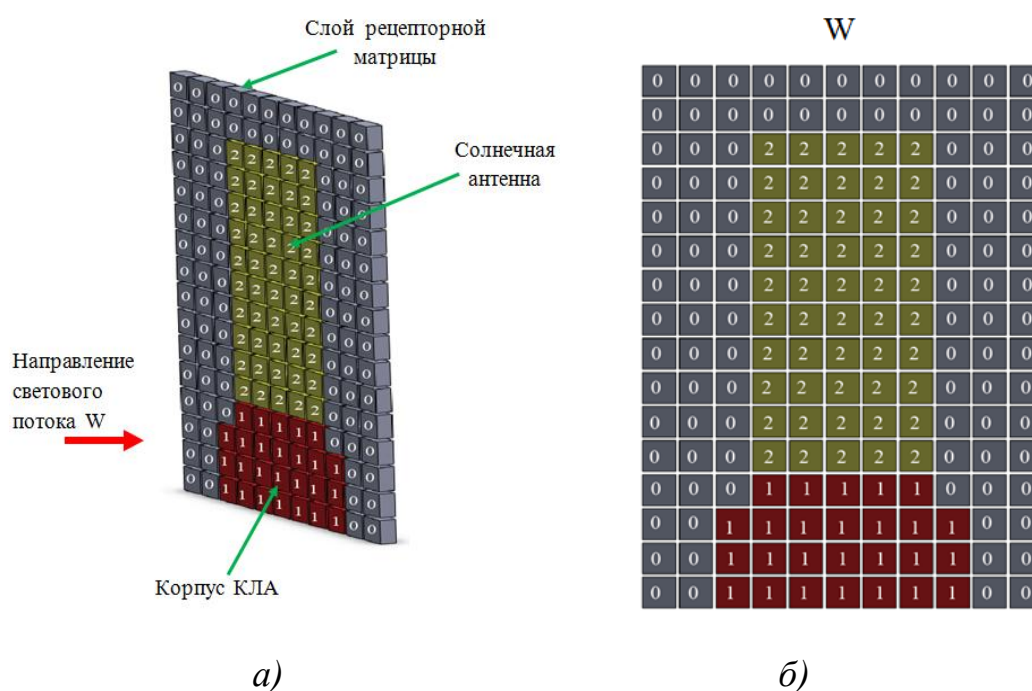
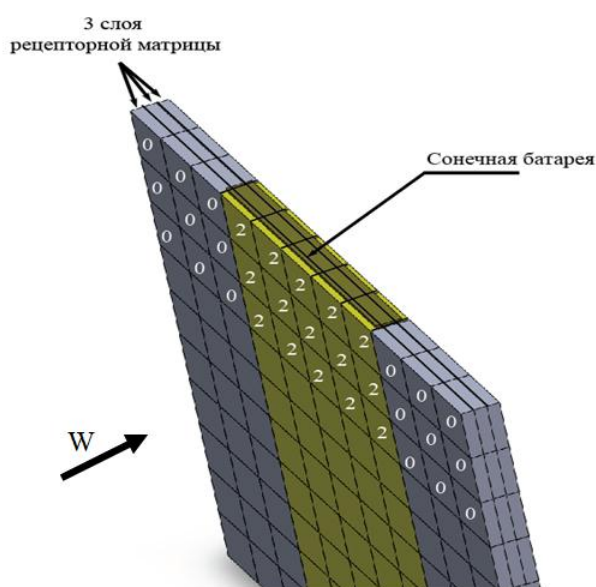


Рисунок 2.11 - Однослойный срез рецепторной матрицы (*а*), вид этого среза по направлению потока (*б*)

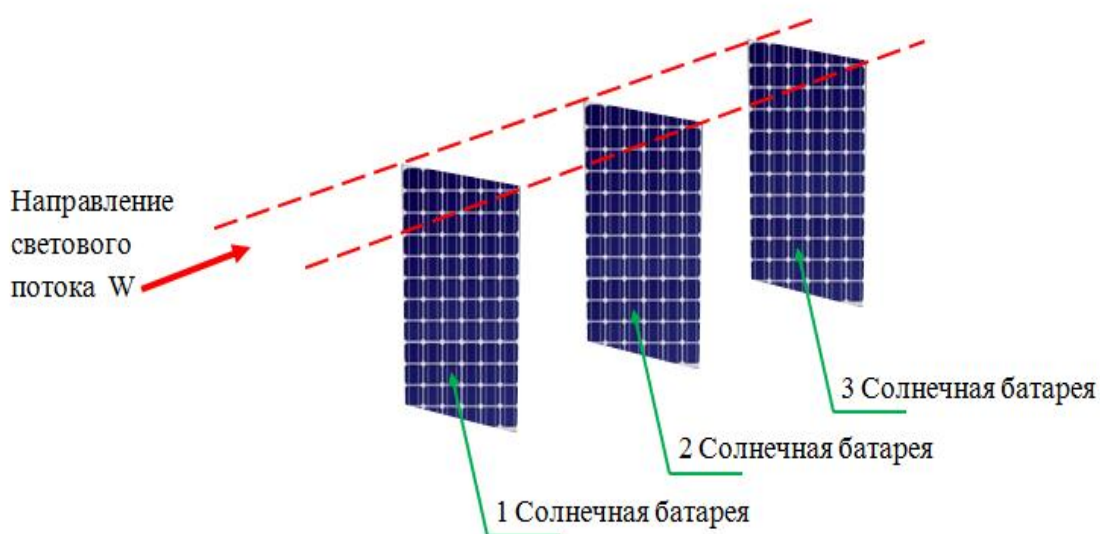
Однако при всей простоте и очевидности такой геометрической модели подсчета площадей, она обладает очевидными недостатками. По этой модели

подсчет площадей производится в каждом срезе рецепторной матрицы. Если размеры рецепторов относительно меньше, чем те, которые показаны на рисунке 2.11 *a*, через объем солнечной батареи могут проходить не один, а несколько слоев рецепторной матрицы (например 3 слоя на рисунке 2.12 *a*). В этом случае каждый слой "увидит" солнечную батарею и заполнит область пересечения с ней кодами "2", а потом необоснованно внесет эти площади на каждом срезе в общую сумму площадей солнечной батареи. Таким образом, если через солнечную батарею пройдет 3 слоя (как на рисунке 2.12 *a*), то расчетная эффективная площадь батарей будет необоснованно увеличена в 3 раза, если 5 слоев - то в 5 раз и т.п.

Другой недостаток такой модели показан на рисунке 2.11 *б*. Если солнечные батареи расположены друг за другом (как некоторые панели станции "Мир", изображенной на рисунке 1.2 *a*), то в нашей модели площади всех 3-х солнечных батарей, показанных на рисунке 2.12 *б*, нашей моделью будут учтены и необоснованно добавлены в общую эффективную площадь солнечных батарей. Ведь из рисунке 2.12 *б* видно, что по направлению потока энергии W эффективно работает только 1-я батарея, а остальные ей полностью заэкранированы и в расчет эффективной площади учитываться не должны.



a)



б)

Рисунок 2.12 - Источники ошибок геометрической модели: *а* - прохождение многих слоев рецепторной матрицы; *б* - экранирование солнечных батарей по направлению потока энергии W

Все это требует усложнения описанной геометрической модели. Оно должно исключить необоснованный повторный учет заэкранированных объектов. Для этого введем в рецепторной матрице дополнительный код (например "3"), который исключит учет площадей соответствующих рецепторов. Суть изменения модели в том, что один раз поглощенная часть потока энергии больше не должна учитываться. Поэтому начиная с некоторого среза рецепторной матрицы все, что следует за этим срезом за элементом с кодом "2" принудительно заполняется запрещающим кодом "3", не позволяющим использовать рецепторы с этим кодом в каких-либо расчетах. Схема алгоритма такой модифицированной модели представлена на рисунке 2.13.

В результате работы этого алгоритма элементы КЛА получают коды, показанные на рисунке 2.14 *а*, а рецепторная матрица пример вид, показанный на рисунке 2.14 *б*.

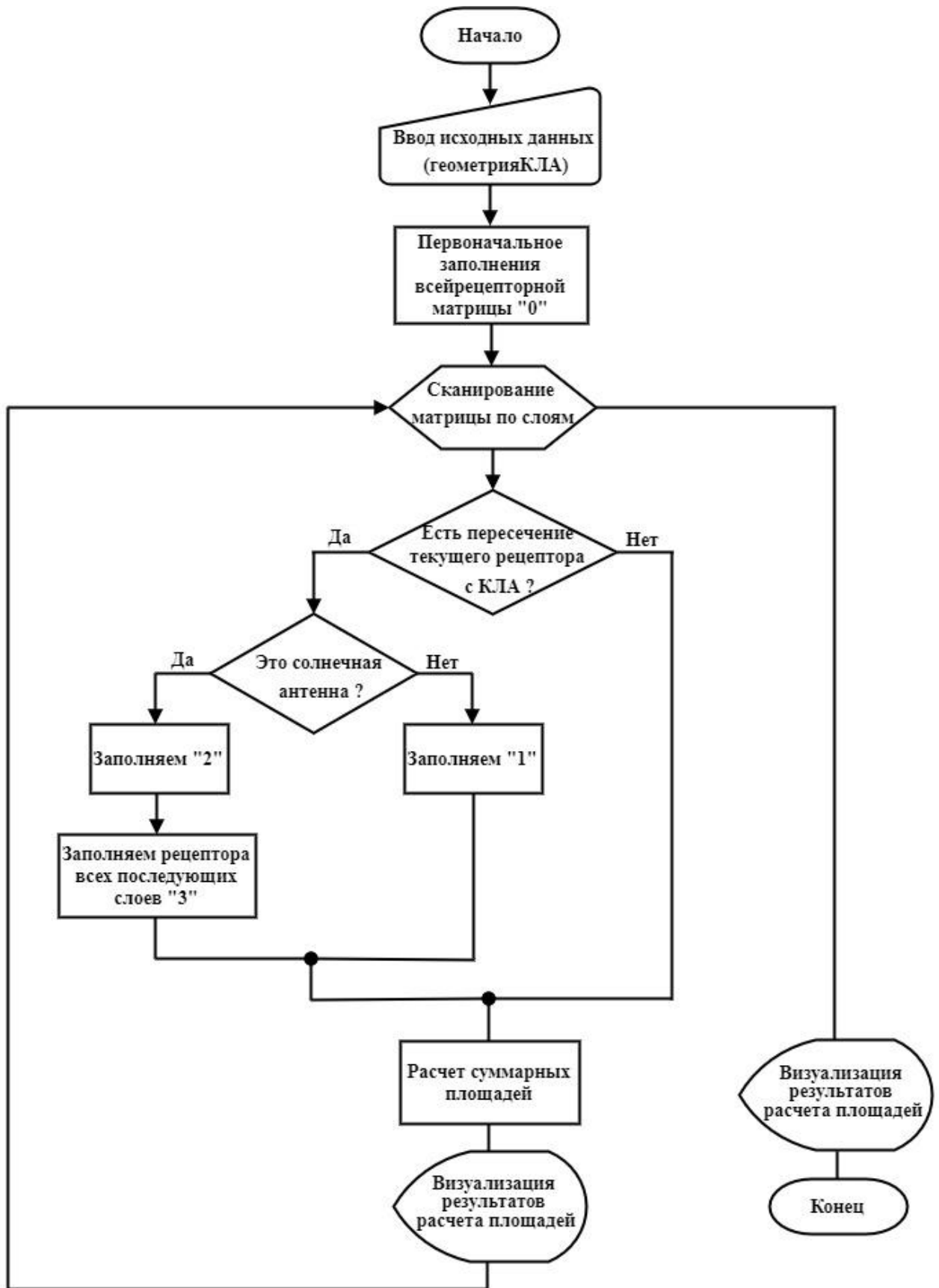


Рисунок 2.13 - Схема алгоритма модифицированной геометрической модели с учетом площадей затенения солнечных батарей друг другом

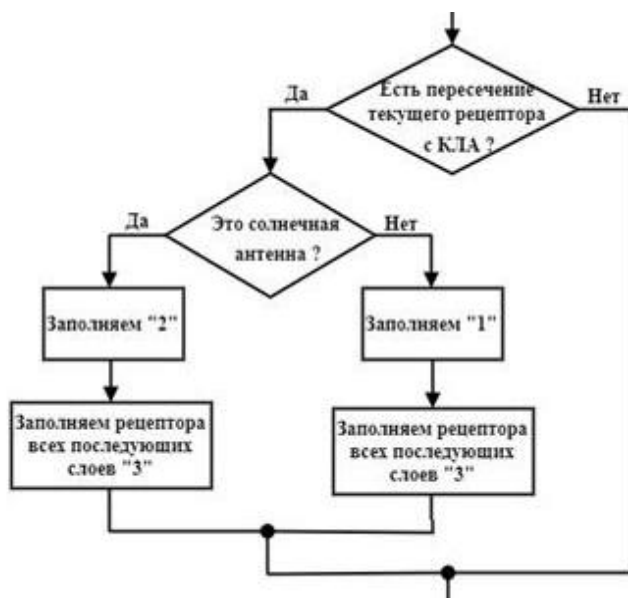
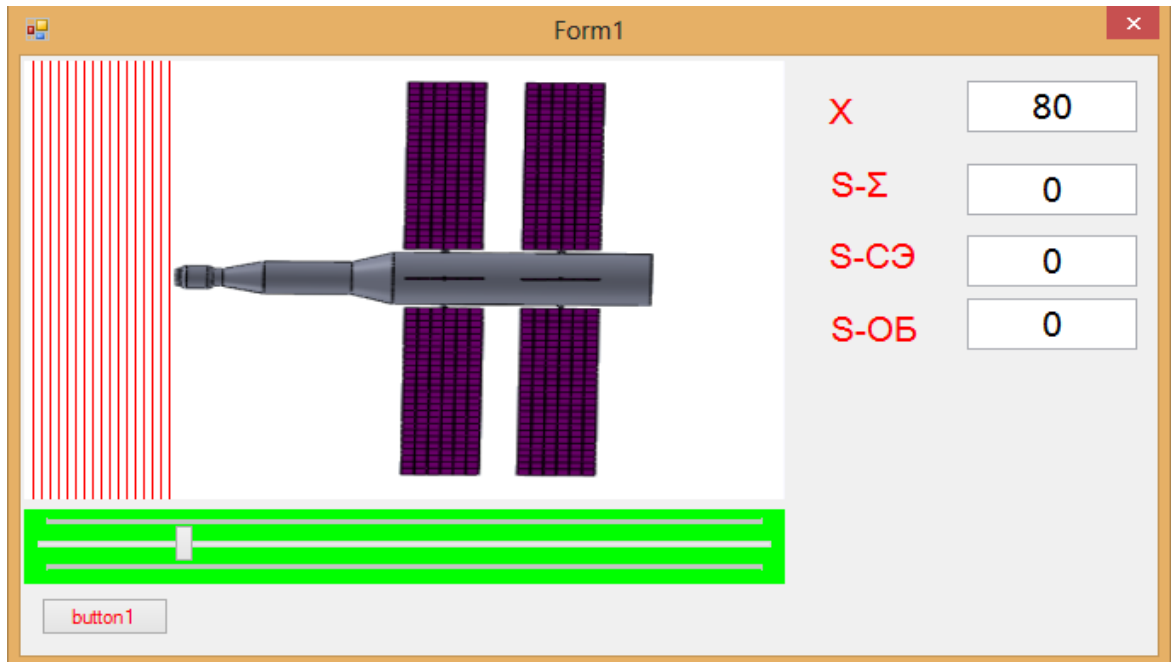


Рисунок 2.17 - Схема фрагмента алгоритма с учетом площадей затенения солнечных батарей другими элементами КЛА

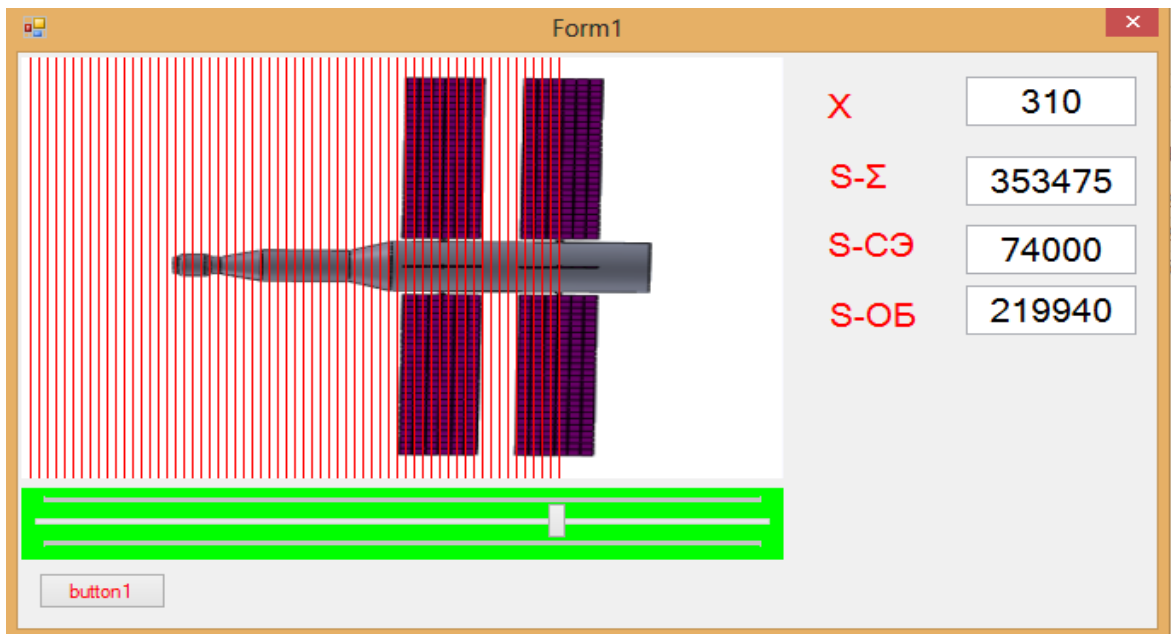
Работа программного комплекса происходит следующим образом. После ввода информации о геометрических размерах станции и солнечных батарей (в параметрическом виде) начинается послойное сканирование сечений (рисунок 1.10). При этом из 3D матрицы, в которую погружен весь наш объект (КЛА), в каждом слое формируется 2D матрица, вид которой ранее был показан на рисунке 2.9 б. При этом в каждом сечении (срезе) 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 2.18 а видно, что секущая плоскость рецепторной матрицы еще не дошли до модели КЛА, поэтому все площади сечений равны нулю.

На рисунке 2.18 б видно, что секущая плоскость 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 2.18 в видно, что секущая плоскость полностью прошла через всю 3D модель КЛА, поэтому как текущие, так и накопленные суммы площадей в окнах

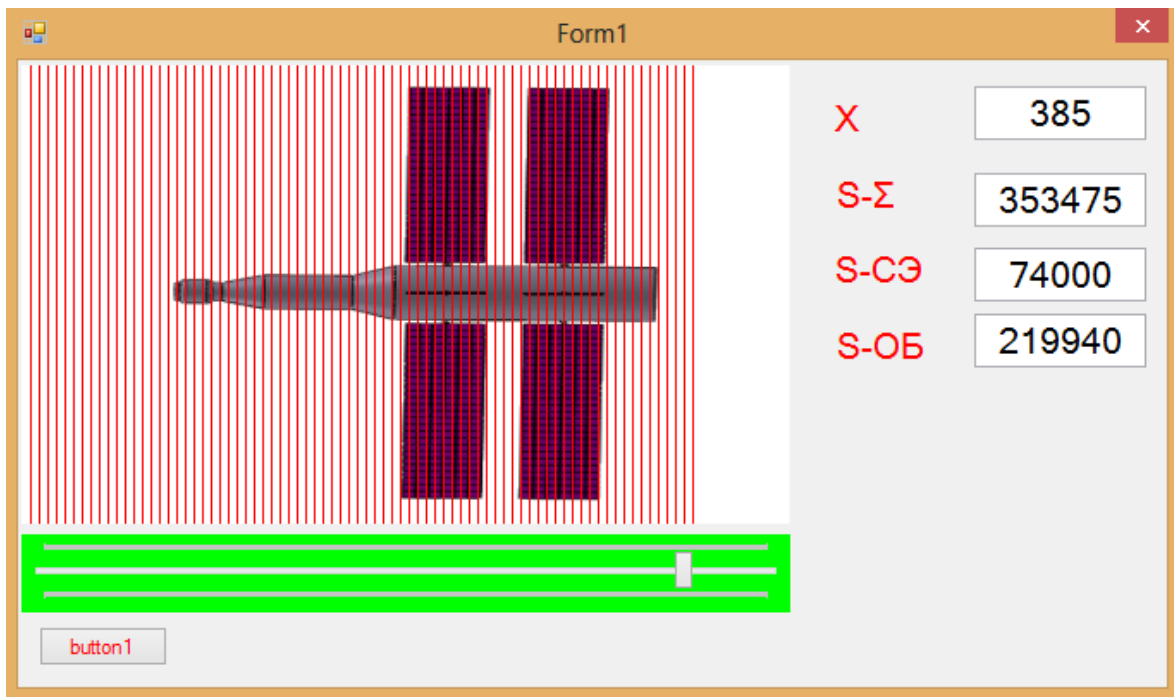
программы больше изменяться не будут. Таким образом, мы решили поставленную задачу - определили суммарную видимую площадь (с определенного ракурса) как корпуса космической станции, так и ее солнечных батарей.



a)



б)



в)

Рисунок 2.18 - Сканирование 3D модели КЛА для вычисления площадей сечений солнечных батарей и корпуса КЛА

2.3 Геометрическое моделирование степени затененности солнечных батарей КЛА при наклонном положении потока солнечной энергии

Важнейшим вопросом геометрического моделирования задачи взаимного затенения элементов КЛА является ориентация самого КЛА относительно направления падающего потока энергии.

Изображенная на рисунке 2.18 секущая плоскость в рецепторной матрице 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.

Прежде чем перейти к этому вопросу рассмотрим более общий случай - когда положение КЛА не будет соосно направлению падающей солнечной энергии

(рисунок 2.19 *а*). В этом случае вид КЛА со стороны падающей солнечной энергии будет таким, как показано на рисунке 2.19 *б*, но и в этом случае мы хотели бы, чтобы эффективная (незатененная) площадь солнечных батарей S стремилась бы к максимуму.

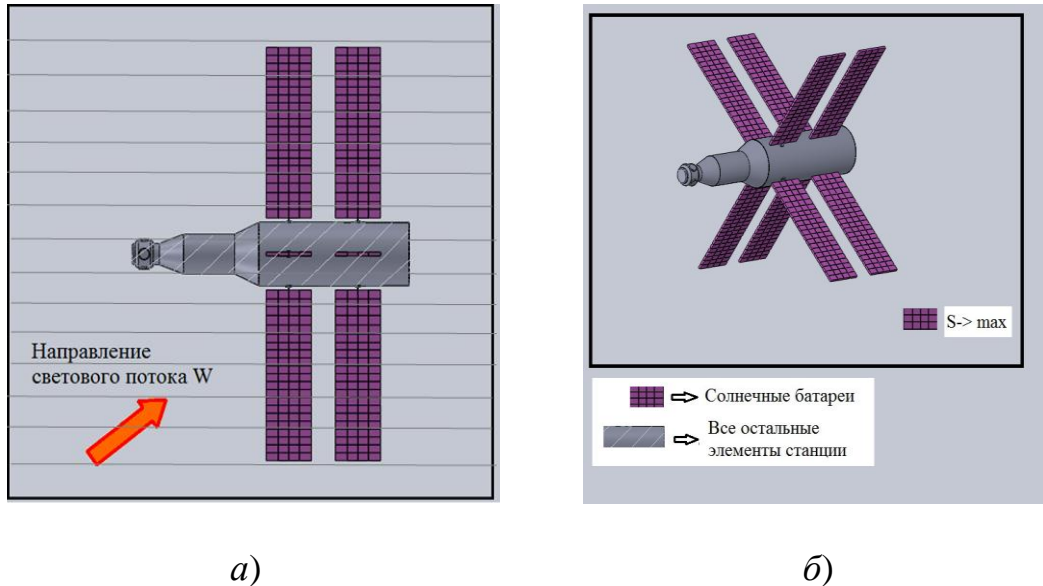


Рисунок 2.19 - Положение КЛА относительно Солнца (*а*) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (*б*)

В этом случае наши расчеты усложняются, но мы для их облегчения используем следующий прием – разместим КЛА в рецепторной матрице так, чтобы направление источника света W совпадало с направлением граней рецепторной матрицы (рисунок 2.20 *а*), а сам КЛА находился в рецепторной матрице под некоторыми углами относительно граней, соответствующим его ориентации в пространстве относительно вектора W . Такой поворот достигается использованием элементарных формул аналитической геометрии поворота осей координат. Вид на КЛА со стороны солнечного потока энергии показан на рисунке 2.20 *б*.

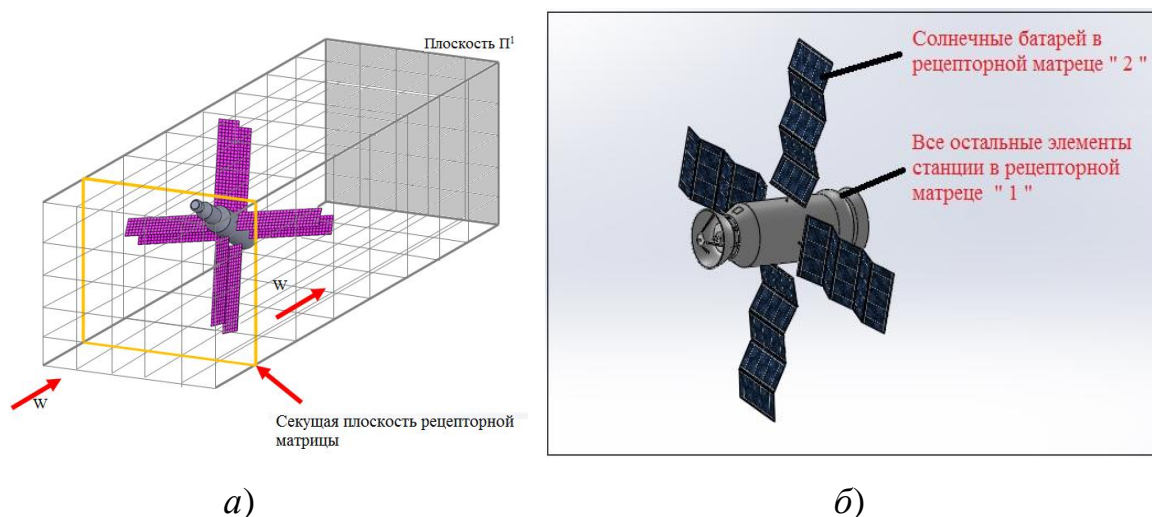


Рисунок 2.20 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид КЛА со стороны

Углы наклона КЛА относительно координатных осей рецепторной матрицы будем рассчитывать по требованиям ГОСТ Р 51794-2008 – "Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек" и ГОСТ 20058-80 "Динамика летательных аппаратов. Термины, определения и обозначения". Эти расчетные углы показаны на рисунке 2.21.

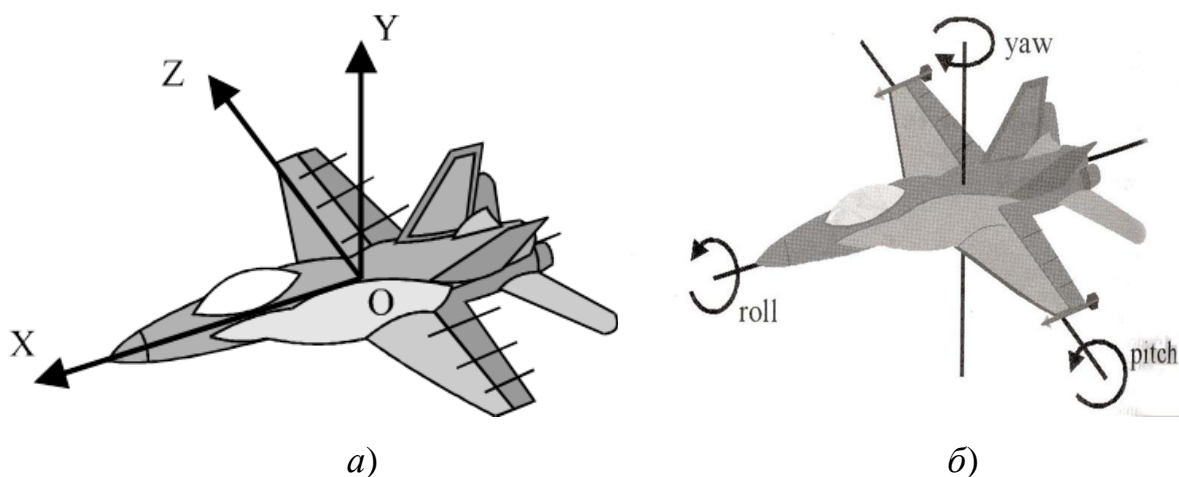


Рисунок 2.21 - Координатные оси (а) и углы (б), задающие положение летательного аппарата в пространстве

При таком положении КЛА в рецепторной матрице мы, проецируя срез каждой матрицы на некоторую плоскость проекций Π' , получим суммарный образ

совокупности определенных значений – нулей, единиц или двоек. Он будет похож на графический образ, представленный на рисунке 2.22. 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 (рисунок 2.22 а). Однако если на срезе рецепторной матрицы имеются рецепторы с кодом "3" (рисунок 2.22 б), то эти рецепторы игнорируются и подсчете суммарного значения эффективной площади S не участвуют.

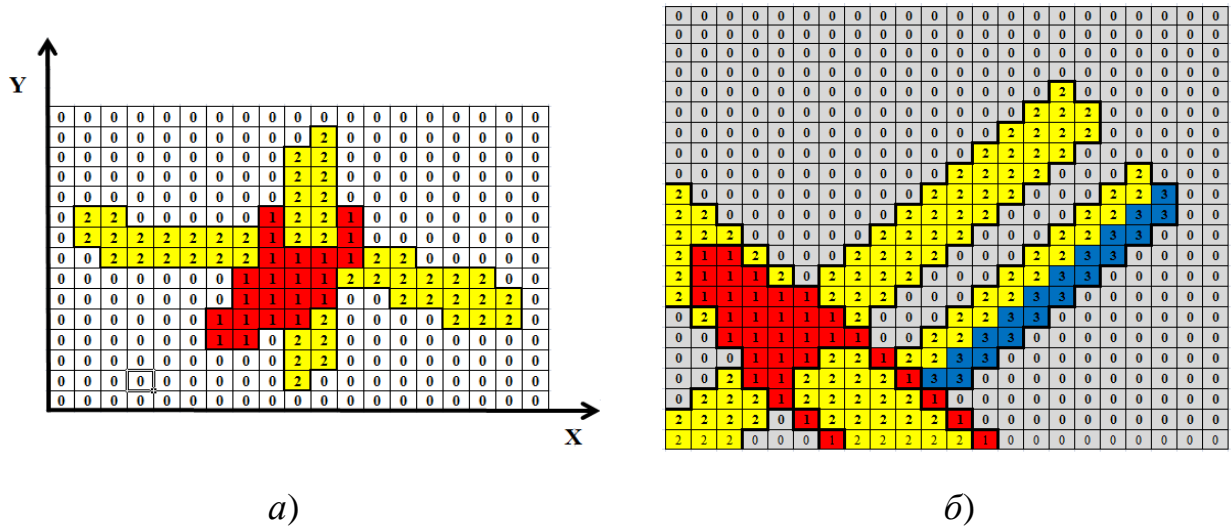
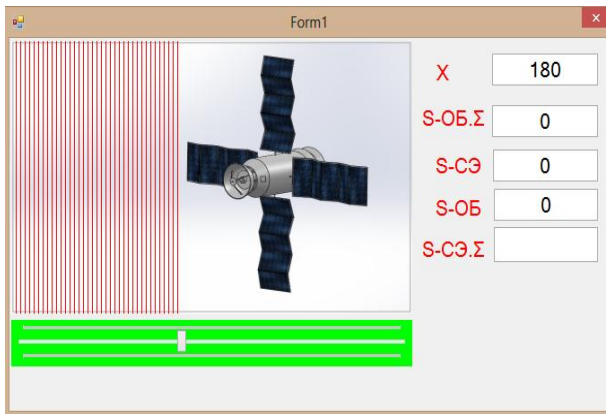
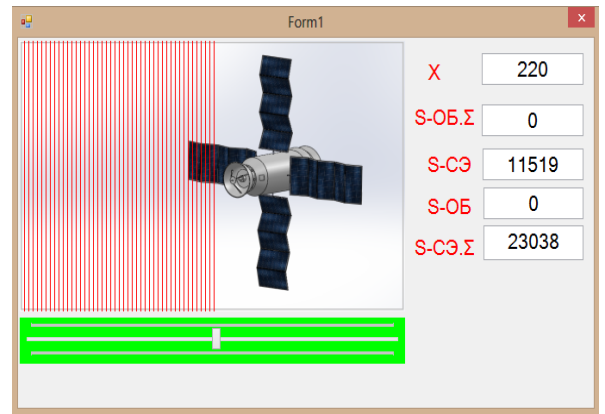


Рисунок 2.22 - Пример итогового геометрического образа проекций элементов КЛА на плоскость проекций Π'

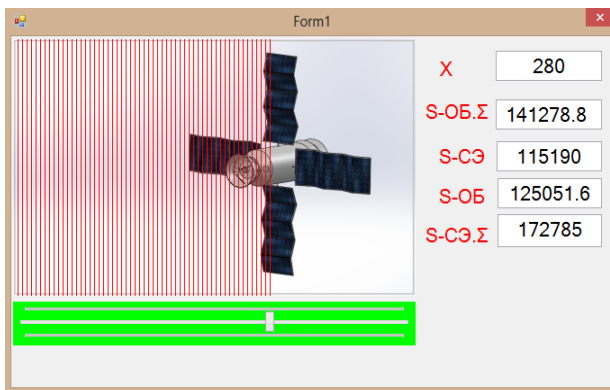
Одно из положительных свойств рецепторных геометрических моделей – возможность быстрого расчета сумм значений рецепторов. Имея на каждом срезе плоскую рецепторную матрицу типа изображенной на рисунке 2.22, мы можем рассчитать суммарное значение «двоек» и тем самым, эффективную площадь солнечных батарей для конкретной геометрии КЛА при его конкретной ориентации относительно направления потока энергии Солнца. Пример работы программы на языке C# для наклонно ориентированного КЛА приведен на рисунке 2.23 (a...d). На этом рисунке показаны результаты расчетов по мере перемещения секущей плоскости вдоль среза матрицы.



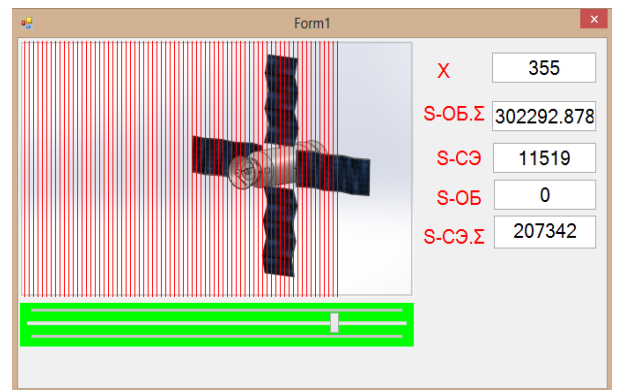
a)



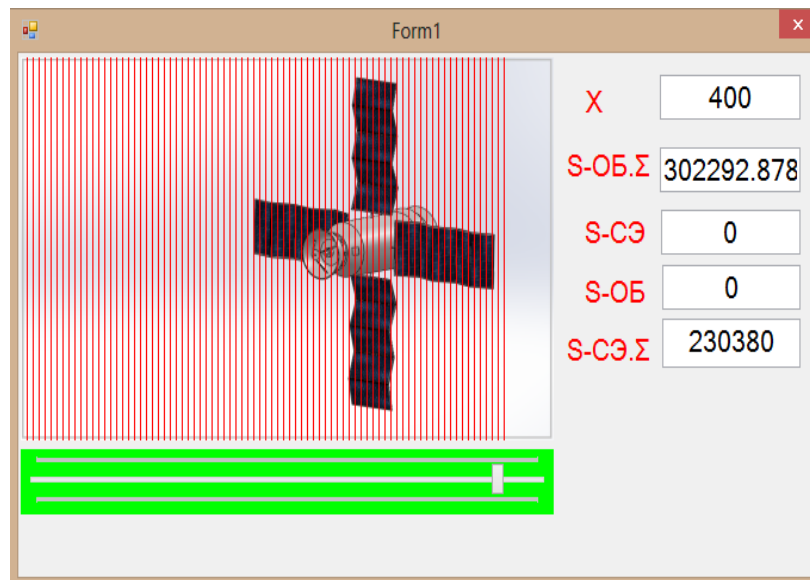
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.23 - Этапы сканирования 3D модели КЛИА наклонного положения для вычисления площадей сечений солнечных батарей и корпуса КЛИА

Пример использования сканирующего алгоритма, основанного на использовании предложенной геометрической модели для КЛА с более сложной геометрией солнечных батарей приведен на рисунке 2.24.

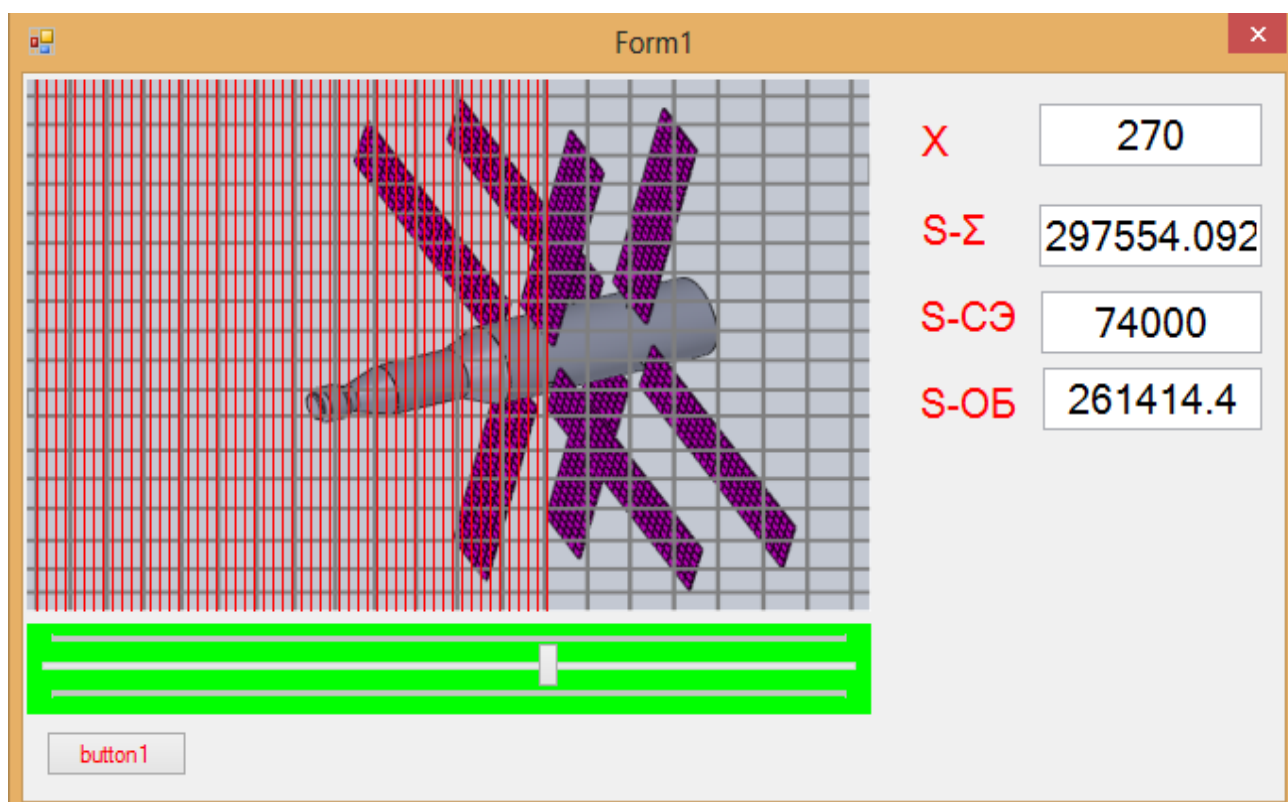


Рисунок 2.24 - Расчет эффективных площадей КЛА при его произвольном положении относительно направления солнечных лучей

2.4 Оптимизация конструктивных параметров КЛА при компоновке солнечных батарей

Приведенное выше описание использование геометрической модели расчета эффективной площади солнечных батарей при заданной исходной геометрии КЛА и его ориентации относительно Солнца позволяет нам 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 за-*

данной формы и геометрии при заданном ракурсе его освещения Солнцем. Такой результат имеет самостоятельную научную и практическую ценность, но при этом возникает вопрос оптимальности полученного результата - насколько удачны исследованная нами форма и расположение солнечных батарей X_i из множества допустимых решений Ω ? Нельзя ли улучшить значение S_{Σ} выбрав какое либо другое конструктивное решение X_j ?

Обратимся к ранее приведенному на стр. 16 рисунку 1.3. Простейшее с конструктивной точки зрения линейное расположение солнечных батарей на КЛА "Союз" (рисунок 1.3 а) может быть продублировано как по длине (на КЛА "Росса" - рисунок 1.3 б), так и круговым расположением относительно центральной оси (на КЛА "Джуно" - рисунок 1.3 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 1.3 г). Кроме того, сами солнечные батареи могут располагаться не в плоскости, а под некоторым углом друг относительно друга (рисунок 1.3 д). Рассмотрение еще более экзотических геометрических форм солнечных батарей (рисунок 1.3 е) выходит за пределы нашего исследования.

Итак, даже для простейшего конструктивного решения X_i , изображенного на рисунке 1.3 а, при заданном ограничении на область допустимых конструктивных решений Ω в виде заданной общей площади солнечных батарей S их конструктивное исполнение будет определяться тремя параметрами (рисунок 2.25) - 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 1.3 а видно, что это не совсем так. Эти принятые нами допущения позволили нам избежать введения еще двух дополнительных конструктивных параметров.

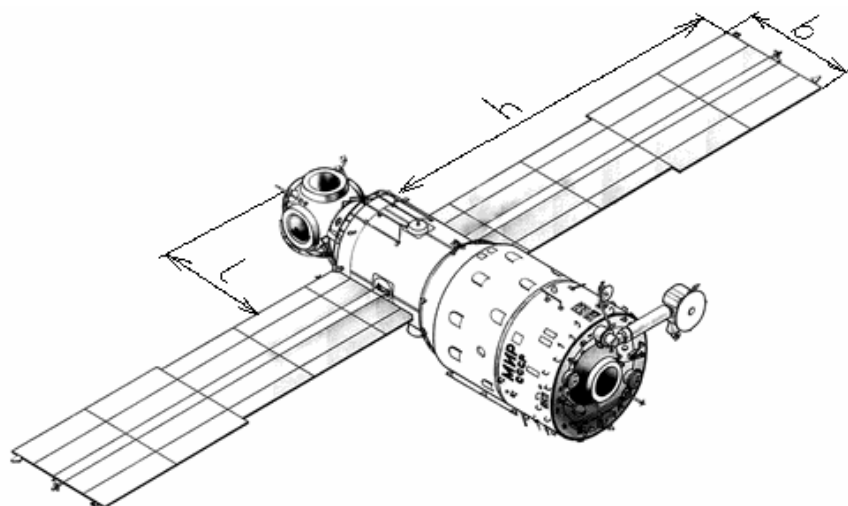


Рисунок 2.25 - Параметры простейшего конструктивного исполнения солнечных батарей (на примере КЛА "Союз")

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 исследования 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 2.25, 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 1.3 б, мы должны будем добавить группу параметров, описывающих следующие группы панелей, при КЛА, изображенном на рисунке 1.3 в - количество панелей относительно оси КЛА, для КЛА на рисунке 1.3 г - угол поворота панелей относительно КЛА в направлении Солнца, для КЛА на рисунке 1.3 д - параметры "гармошки" и т.д. Та-

ким 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 Ω , 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 2.26. Отсутствие аналитического описания исследуемой функции исключает использование градиентных методов поиска экстремума, поэтому единственным способом поиска экстремума для нас остается слепой случайных поиск [183]. 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.

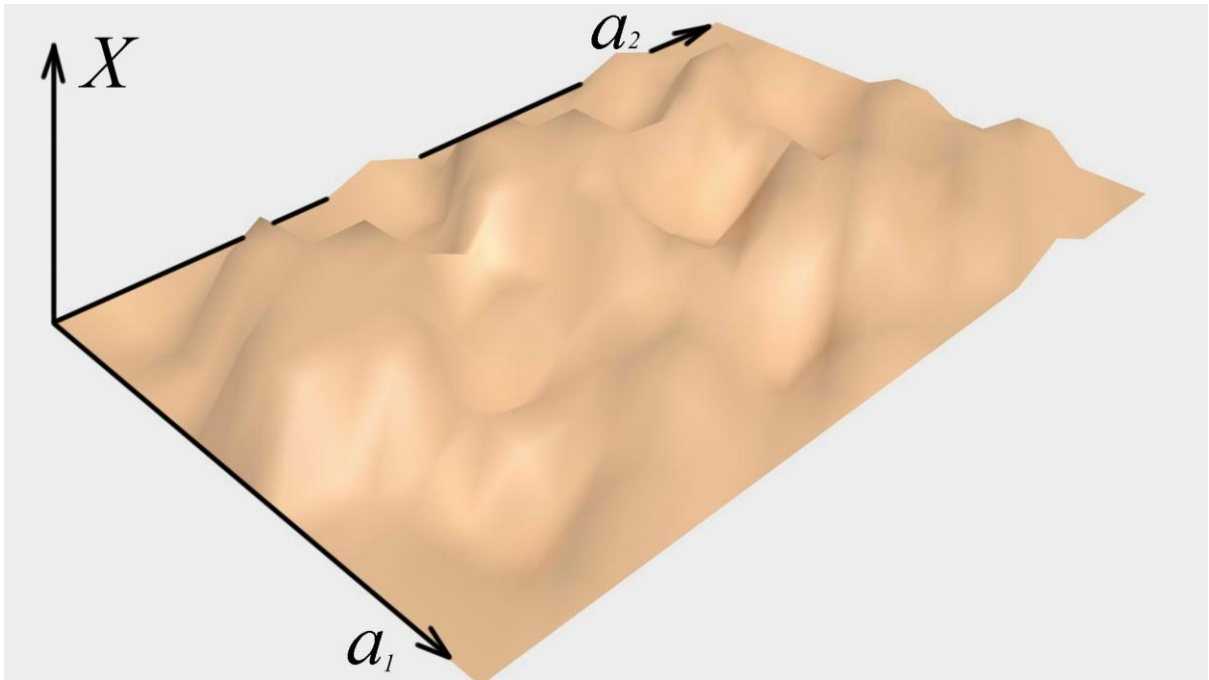


Рисунок 2.26 - Примерный вид функции цели X для 2-х переменных

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 [170, 171]. 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 (щелевидный) 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 2.25 при фиксированном направлении солнечного потока (также соответствующего рисунку 2.25) показан на рисунке 2.27. 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.

Расчеты затененности солнечных антенн в рамках внедрения результатов исследования были проведены для изделий "Знамя-2" и "Луна-Глоб" (акт внедрения - приложение 1). Однако конкретные результаты этих расчетов, раскрывающие некоторые технические параметры вышеназванных КЛА, по настоятельной просьбе внедряющей организации (НТЦ "Элис" при Национальном институте авиационных технологий - НИАТ) в данной диссертации не приводятся.

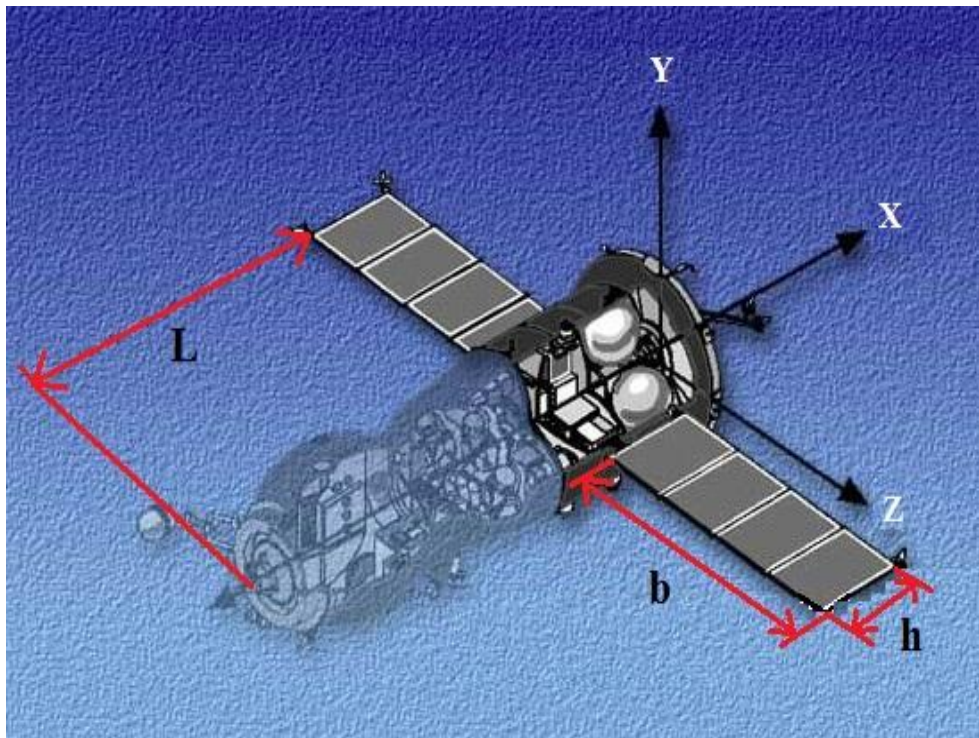
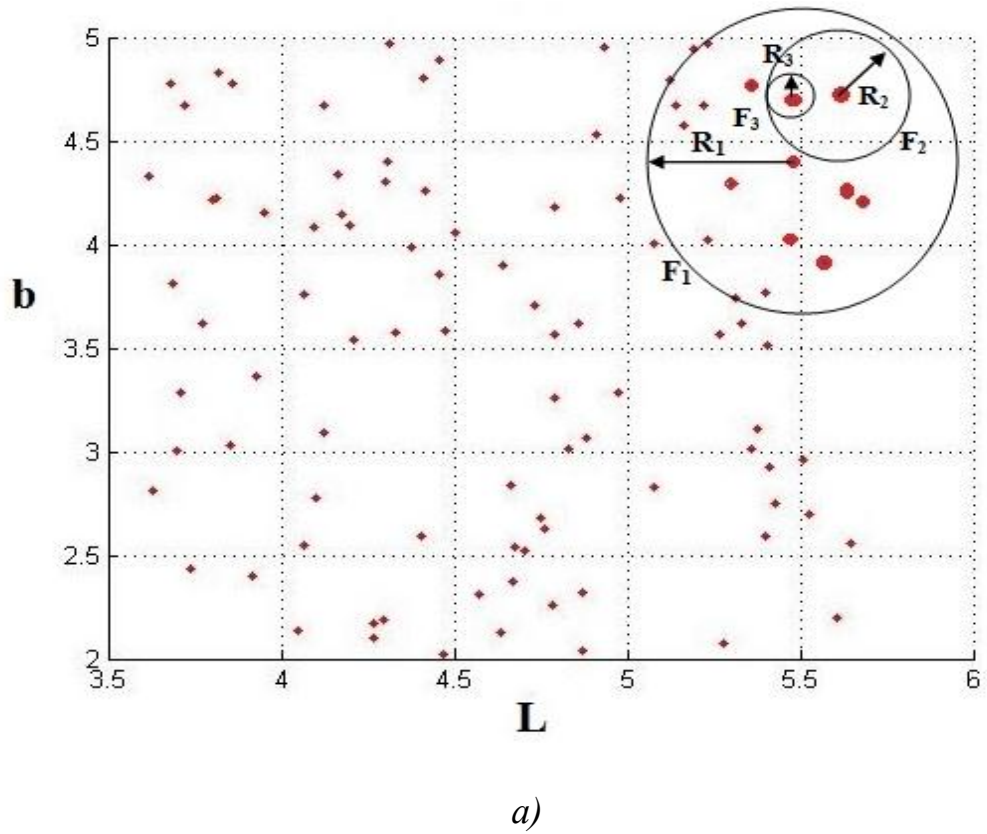
*б)*

Рисунок 2.27 - Сужающиеся окрестности в области допустимых решений (*a*) и оптимизируемые конструктивные параметры КЛА "Союз" (*б*)

Заключение и выводы по разделу 2

Проведенное в данном разделе создание и исследование геометрической модели оценки затененности солнечных батарей КЛА позволяет сделать следующие выводы:

1. Рецепторные геометрические модели являются универсальным аппаратом вычисления суммарной площади солнечных батарей КЛА при их любых размерах, форме и ориентации относительно падающего потока энергии.

2. На основании рецепторных геометрических моделей разработаны сканирующие алгоритмы вычисления площадей затенения поверхностей различного типа КЛА, а также модификации этих алгоритмов, учитывающих конструктивные особенности анализируемых КЛА.

3. Построение геометрической модели с использованием четырехзначной логики (рецепторов с кодами "0", "1", "2" и "3" является эффективным приемом, позволяющим разделить эффективную площадь поверхности как солнечных батарей КЛА, так и его основного корпуса.

4. Использование четырехзначной логики позволяет исключить необоснованное завышение расчетных результатов при малых размерах рецепторов, присущее разработанной геометрической модели оценки эффективной освещенности.

5. Разработана основанная на методе сужающейся окрестности методика оптимизации совокупности конструктивных параметров компоновки внешних солнечных батарей по критерию их максимальной эффективности (минимальной затененности солнечных батарей как друг другом, так и другими конструктивными элементами КЛА).

3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЦЕПТОРНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТЕПЕНИ ЗАТЕНЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КЛА И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Программная реализация геометрического моделирования степени затененности солнечных батарей КЛА и визуализация результатов вычислений

Описанная рецепторная геометрическая модель оценки степени затененности солнечных батарей КЛА реализована в виде программного комплекса, написанного на языке C#. Функциональная схема этого комплекса представлена на рисунке 3.1.

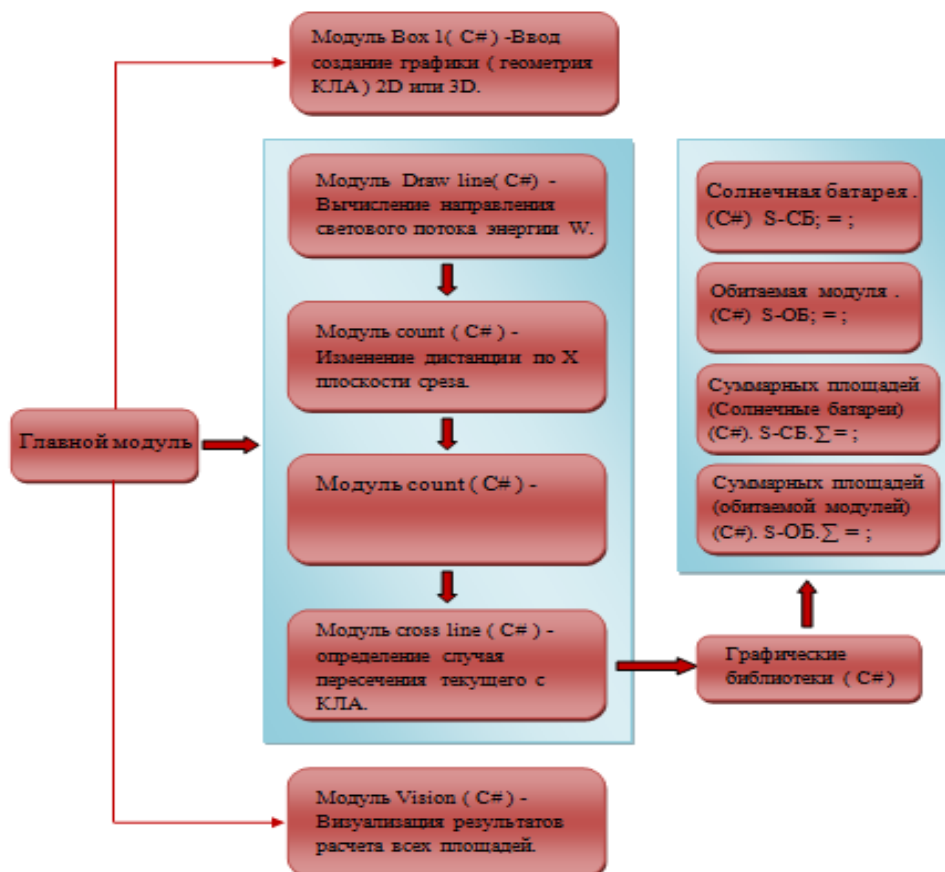


Рисунок 3.1 - Функциональная схема программного комплекса

Основными элементами изображенной на рисунке 3.1 функциональной схемы программного комплекса являются:

Модуль Vox 1 (C#) - обеспечивает ввод геометрической информации л КЛА и формирование рецепторной матрицы. Так же здесь задается точность (дискретность) рецепторной матрицы, в которой производится моделирование и расчеты;

Модуль Draw line (C#) - вычисляет направление потока световой энергии W относительно КЛА и переформирует полученную в результате работы предыдущего модуля рецепторную матрицу таким образом, чтобы направление потока W совпадало с координатными осями рецепторной матрицы, а твердотельная модель КЛА приняла в рецепторной матрице требуемую ориентацию (см. рисунок 2.19 а).

Модуль count (C#) - обеспечивает сканирование по всей длине рецепторной матрицы, измененной предыдущим модулем. В ней происходит изменение дистанции сканирования для того, чтобы выявить на срезе матрицы рецепторы с кодами "1", "2" и "3".

Модуль cross line (C#) - в этом модуле происходит подсчет суммы площадей рецепторов с кодами "1", "2" и "3". Конкретное значение кода рецептора определяется по рецепторной модели КЛА путем ее "среза" соответствующей плоскостью.

Модуль Vision (C#) - обеспечивает как визуализации результатов анализа площадей затенения, так и подготовку расчетных данных для этой визуализации. Их суммирование по сечения. Именно в этом модуле рассчитываются суммы площадей как солнечных батарей (по кодам "2"), так и корпуса КЛА (по кодам "1") за исключением заэкранированного пространства с кодами рецепторов "3". Визуализация результатов производится с помощью графических операторов языка C#. Она производится по данным как текущего сечения сканирования, так и накопленные суммы площадей (рисунок 3.2). В результате работы модуля отображается дистанция сканирования (X), суммарная (накопленная) площадь солнечных батарей по всем сечениям сканирования ($SCЭ-\Sigma$), площадь солнечных бата-

рей в текущем сечении (СЭ) площадь обитаемого модуля в текущем сечении (ОБ) и суммарная (накопленная) площадь обитаемого модуля (СОБ-Σ).

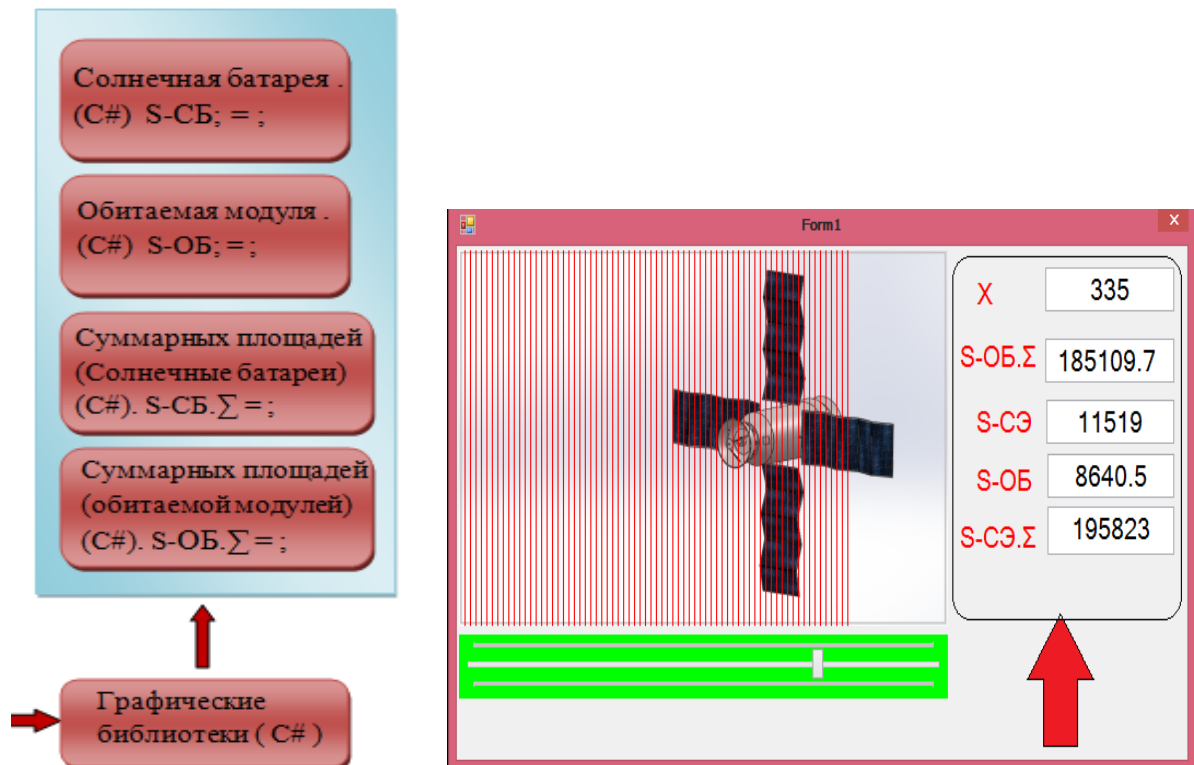


Рисунок 3.2 - Структура модуля Vision (C#) и отображение результатов анализа

При работе программного комплекса сканирование по сечениям производится автоматически, но к определенному сечению можно вернуться вручную, задействовав мышкой изображенный на рисунке 3.2 движок, задающий положение секущей плоскости.

Параметры ПЭВМ, на котором реализован описанный программный комплекс следующие - это ноутбук с центральным процессором (ЦП) - 3210M, с количеством ядер 4, тактовой частотой 2.50 GHz и объемом кэш-памяти - 6144 Мб. Данный процессор 3210M является мобильным исполнением процессора 3-го поколения Intel® Core™ i5. Оперативная память ноутбука - DDR3 типа 1600 объемом 6 Гб, работающая в двухканальном режиме, объем дисковой памяти 750 Гб. Требования к видеокарте ПЭВМ не критичны, так как выводимое изображе-

ние несложное и нединамичное. В нашем случае была использована видеокарта производства компания Intel HD4000 с количеством видеопамати 2048 Мб.

Таким образом мощность используемой в нашем исследовании вычислительной техники можно оценить как среднюю на момент написания диссертации.

3.2 Оценка точности и эффективности реализации геометрической модели степени затененности солнечных батарей КЛА

Очевидно, что рецепторные геометрические модели, в силу своей дискретности, являются приближенными, причем степень точности описания геометрической формы определяется размерами рецепторов (рисунок 3.3).

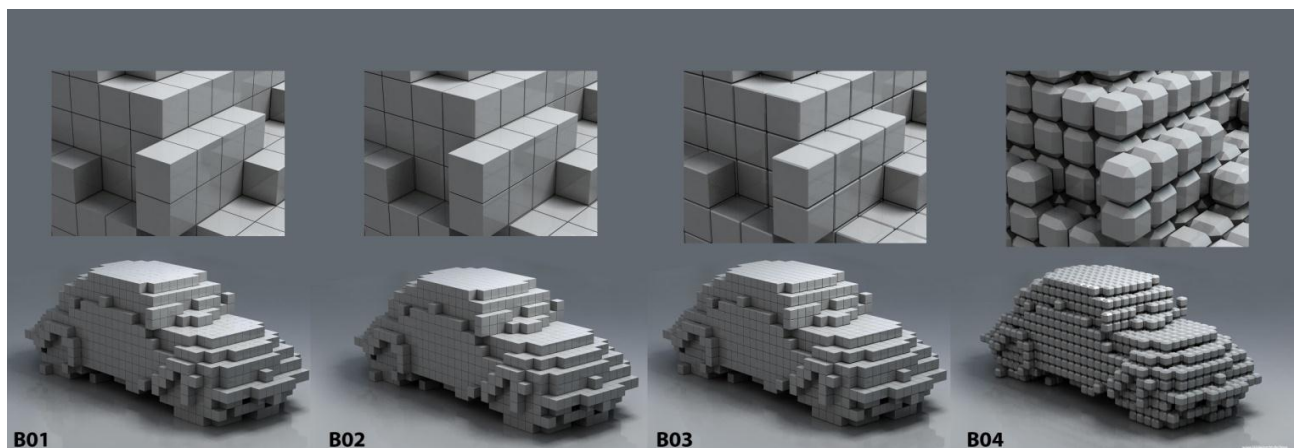


Рисунок 3.3 - Увеличение точности описания формы объекта при уменьшении размеров рецептора (рисунок из интернета)

Исследование точности рецепторных геометрических моделей проводилось в трудах Г.В.Корн, Ситу Лина и Ньи Ньи Хтуна [17, 18]. Оно показало, что в реальных расчетах внутренних компоновок авиационной техники возможно обеспечение точности примерно в 1 см^2 при продолжении вычислительного процесса 2...5 минут. Однако эти исследования проводились для задач внутренней компоновки. Специфика нашей задачи (внешняя компоновка КЛА) требует другого подхода к оценке точности нашей рецепторной модели.

Для оценки точности реализации будем исследовать тестовую модель КЛА, геометрические параметры которой позволяют заранее определить значение эффективной площади солнечных батарей. Это позволит нам "прогнать" эту модель через реализованную на языке С# геометрическую модель с заранее известными параметрами эффективной освещаемой площади.

Так результаты вычисления площади для тестового КЛА с заранее известными теоретическими значениями S - эффективной (незатененной) поверхности солнечных батарей КЛА приведены в таблицах 3.1-3.5.

Для тестового примера КЛА с фиксированной эффективной площадью солнечных батарей 15 м^2 значения вычисленного программой результата в зависимости от размера рецептора приведены в таблице 3.1, а для тестового примера с $S=30 \text{ м}^2$ - в таблице 3.2.

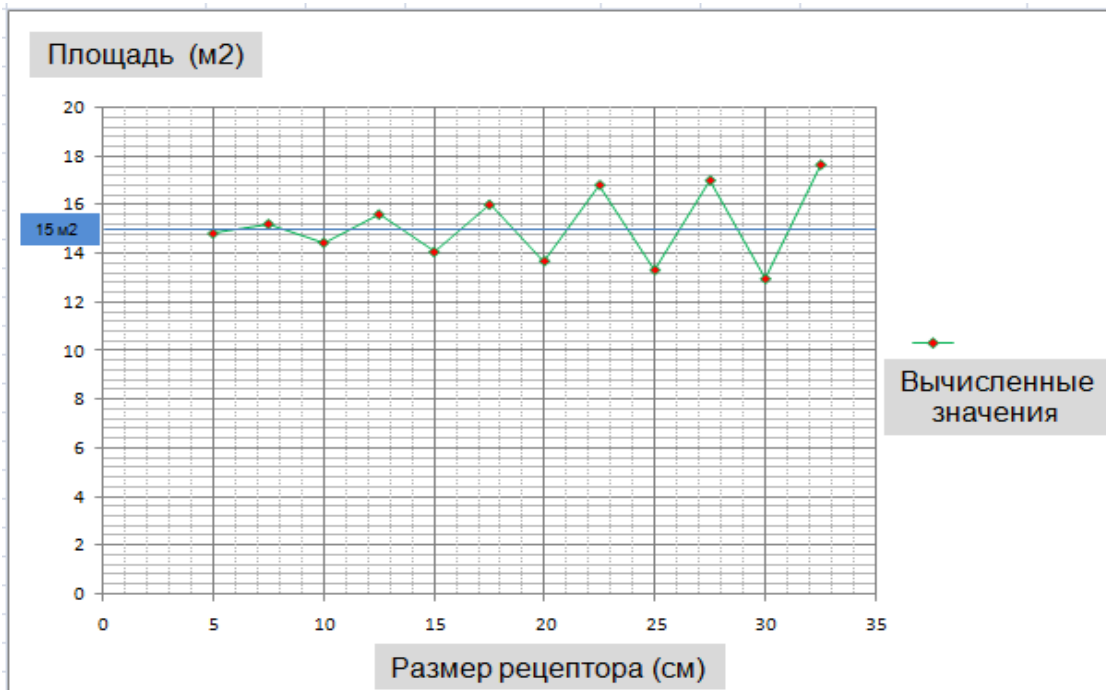
Таблица 3.1 - Вычисленные значения площадей тестового примера в зависимости от размера рецептора (для $S=15 \text{ м}^2$)

Размер рецептора	Площадь
5 см	14.8225 м ²
7.5 см	15.21 м ²
10 см	14.44 м ²
12.5 см	15.6025 м ²
15 см	14.0625 м ²
17.5 см	16 м ²
20 см	13.69 м ²
22.5 см	16.81 м ²
25 см	13.325 м ²
27.5 см	17 м ²
30 см	12.96 м ²
32.5 см	17.64 м ²

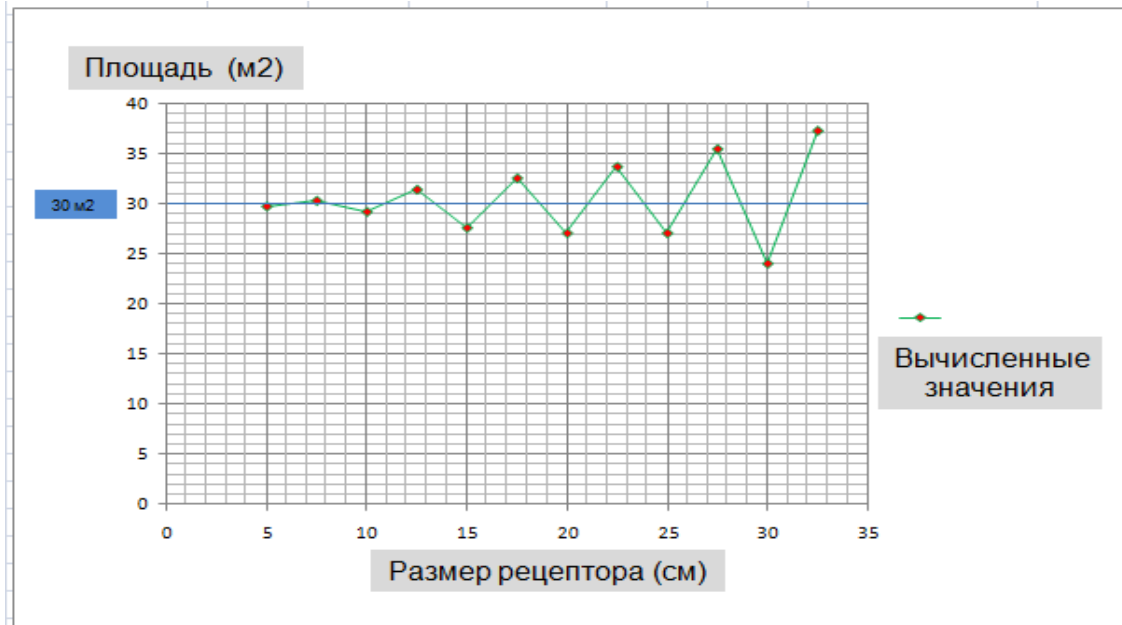
Таблица 3.2 - Вычисленные значения площадей тестового примера
в зависимости от размера рецептора (для $S=30 \text{ м}^2$)

Размер рецептора	Площадь
5 см	29.7025 м ²
7.5 см	30.25 м ²
10 см	29.16 м ²
12.5 см	31.36 м ²
15 см	27.5625 м ²
17.5 см	32.49 м ²
20 см	27.04 м ²
22.5 см	33.64 м ²
25 см	27.04 м ²
27.5 см	35.4025 м ²
30 см	24.01 м ²
32.5 см	37.21 м ²

Результаты этих проверочных расчетов представлены на рисунке 3.4.



а)



б)

Рисунок 3.4 - Вычисленные значения площадей солнечных батарей в тестовых примерах: *а* - для площади $S=15 \text{ м}^2$, *б* - для площади $S=30 \text{ м}^2$

Из рисунка 3.4 видно, что для обоих тестовых примеров $S=15 \text{ м}^2$ и $S=30 \text{ м}^2$ кривая регрессии не уходит от теоретической площади солнечных батарей, что говорит о корректности предложенной нами геометрической модели. С увеличением размера рецептора расчетное значение эффективной площади все более ощутимо отклоняется от теоретического значения, что вполне ожидаемо. У нас нет объяснения того факта, что вычисленные значения странным образом расположились столь симметрично теоретической кривой с номинальными значениями (см. рисунок 3.4). По видимому, это связано с предопределенностью дискретного алгоритма вычисления эффективной площади солнечных батарей.

На основании результатов, отраженных в таблицах 3.1 и 3.2 подсчитаем погрешности вычислений в зависимости от размера рецептора в расчетной модели. Очевидно, что чем меньше размер рецептора, тем меньше значение погрешности (выше точность вычислений). Так же из теории рецепторных моделей известно, что за увеличение точности вычислений путем уменьшения размеров приходится расплачиваться временем вычислений.

Результаты сопоставления точности и времени вычислений (процессорного времени) представлены в таблицах 3.3 и 3.4. Необходимо отметить, что для расчетов использовался персональный компьютер (ПК) с характеристиками производительности чуть выше средних.

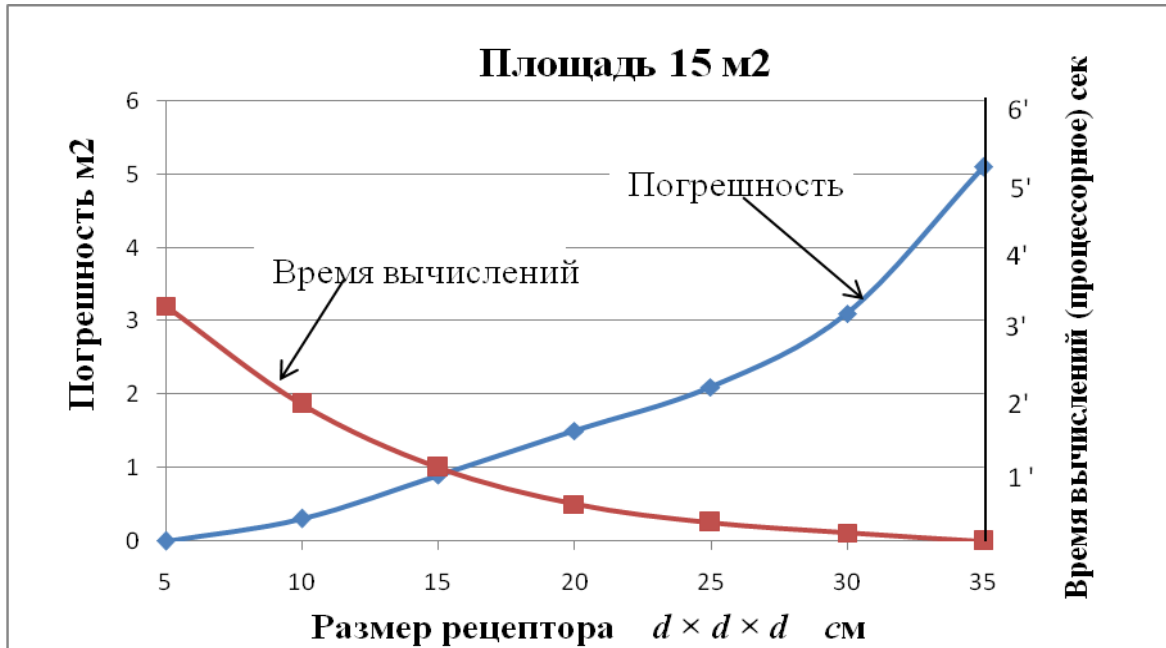
Таблица 3.3 - Вычисленные значения погрешности вычислений площадей тестового примера и процессорного времени вычислений в зависимости от размера рецептора (для $S=15 \text{ м}^2$)

№	Размер рецептора	Погрешность	Время вычислений
1	5 см	0,1 м ²	3,2 сек
2	10 см	0,3 м ²	1,87 сек
3	15 см	0,9 м ²	1 сек
4	20 см	1,5 м ²	0,5 сек
5	25 см	2,1 м ²	0,25 сек
6	30 см	3,1 м ²	0,11 сек
7	35 см	5,1 м ²	0,06 сек

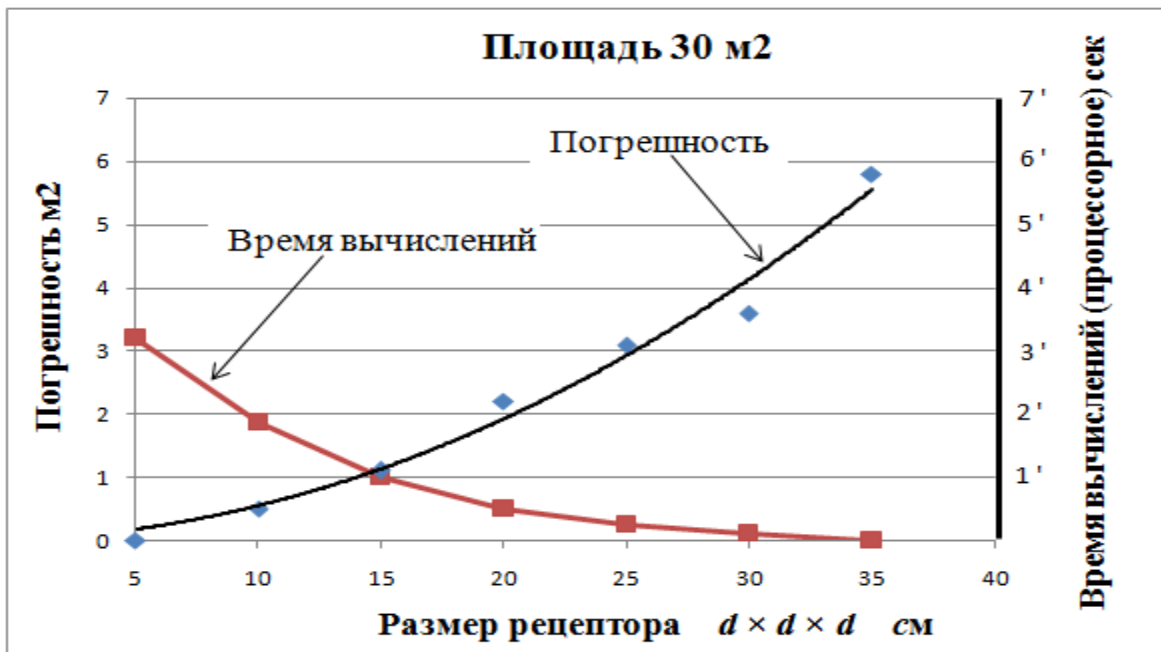
Таблица 3.4 - Вычисленные значения погрешности вычислений площадей тестового примера и процессорного времени вычислений в зависимости от размера рецептора (для $S=30 \text{ м}^2$)

№	Размер рецептора	Погрешность	Время вычислений
1	5 см	0,1 м ²	3,2 сек
2	10 см	0,5 м ²	1,87 сек
3	15 см	1,1 м ²	1,0 сек
4	20 см	2,2 м ²	0,5 сек
5	25 см	3,1 м ²	0,25 сек
6	30 см	3,6 м ²	0,11 сек
7	35 см	5,8 м ²	0,08 сек

Результаты верификации, представленные в таблицах 3.3 и 3.4 визуализированы на рисунке 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5 - Зависимости вычисленных значений погрешности площадей тестового примера и процессорного времени вычислений от размера рецептора: а - для

$S=15 \text{ м}^2$; б - $S=30 \text{ м}^2$

Полученные результаты говорят о том, что уменьшая размер рецепторов можно достичь высокой точности без существенного увеличения процессорного времени для проведения вычислений. Например из таблицы 3.4 видно, что при размере рецептора 5 см, погрешность вычислений эффективной площади составила $0,1 \text{ м}^2$ при теоретической общей площади солнечных батарей 30 м^2 . Погрешность вычислений при этом составляет $0,33\%$ при приемлемом процессорном времени 3,2 сек, что является вполне приемлемым для практики результатом. По-видимому столь небольшое процессорное время объясняется однородностью выполняемых вычислительных операций, осуществляемых современным ПК с использованием лишь оперативной памяти (без обращения к дисковой в процессе проведения вычислений).

Была проведена попытка в тестовом примере $S=30 \text{ м}^2$ еще более уменьшить размеры рецепторов - с 5 до 1 см. Время вычислений при этом ожидаемо возросло (таблица 3.5), но сравнительно немного. При уменьшении размера рецептора в 5 раз (с 5 до 1 см) процессорное время выросло всего лишь в 2 раза, что говорит о возможности и перспективности использования рецепторных методов в геометрическом моделировании. Результаты этого теста оценки необходимого процессорного времени графически представлены на рисунке 3.6

Таблица 3.5 - Вычисленные значения процессорного времени в зависимости от размера рецептора для $S=30 \text{ м}^2$

No	Размер рецептора	Время вычислений
1	1 см	6,93 сек
2	2 см	5,06 сек
3	3 см	4,06 сек
4	4 см	3,56 сек
5	5 см	3,2 сек

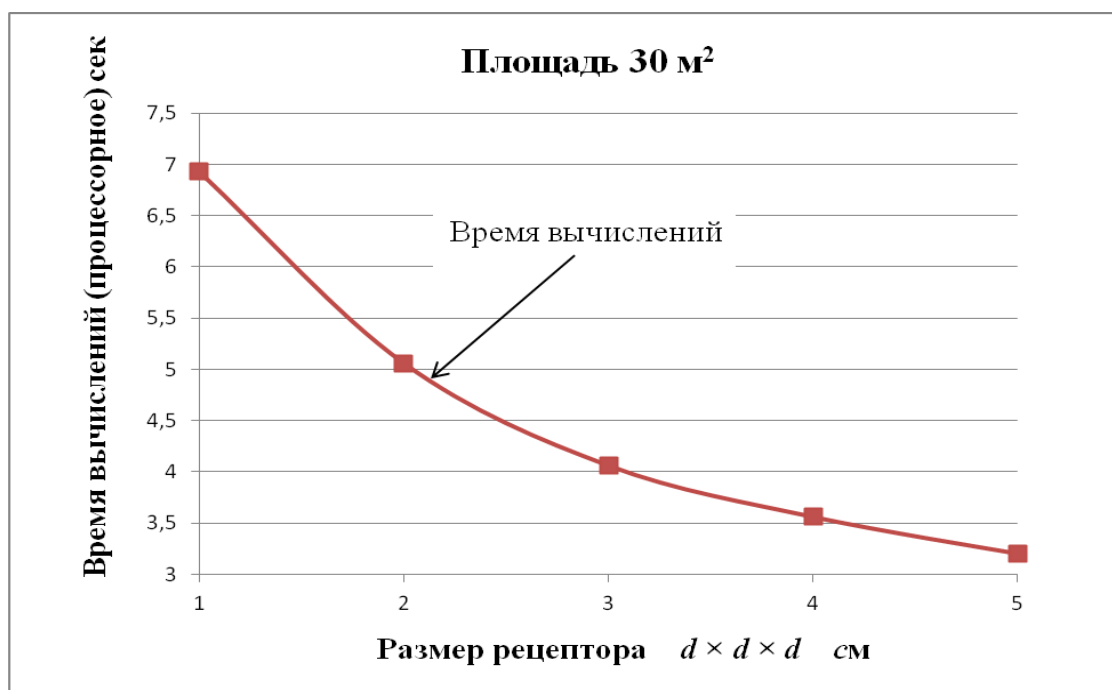


Рисунок 3.6 - Зависимость процессорного времени вычислений эффективной площади от размера рецептора в диапазоне 5...1 см

Очевидно, что далеко не все пути сокращения процессорного времени для компьютерной реализации нашей геометрической модели задействованы, и мы видим и другие пути его сокращения (или же повышения точности получаемых результатов при тех же временных затратах), но полученные и описанные выше результаты по времени (менее 10 секунд процессорного времени) и по точности (десятые доли процента) по оценкам специалистов можно считать вполне приемлемыми для практического применения.

Заключение и выводы по разделу 3

Описанные в данном разделе материалы и результаты исследования по компьютерной реализации разработанной в рамках данной диссертации геометрической модели позволяют сделать следующие выводы:

1. Осуществлена программная реализация на языке C# предложенной в предыдущей главе рецепторной геометрической модели оценки эффективной площади освещения солнечных батарей.

2. Разработана графическая оболочка на языке C# с подключением графических библиотек этого языка, позволяющая визуализировать результаты проведенных расчетов.

3. Проведена верификация результатов работы геометрической модели и ее компьютерной реализации путем сравнения идеальной модели с заранее известными результатами и данными, полученными в результате расчета.

4. Результаты верификации показали, что точность расчетов по геометрической модели ожидаемо зависит от размера рецептора и при размере рецептора 5×5 см погрешность вычислений эффективной площади солнечных батарей площадью 30 м^2 составляет $0,1 \text{ м}^2$, что соответствует $0,33\%$.

5. Проведенная в рамках верификации оценка необходимого процессорного времени показала, что оно зависит от размера рецепторов, но для диапазона их размеров от 20 до 1 см изменяется для реальных КЛА в диапазоне от 0,5 до 6,93 сек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В процессе исследования получены следующие результаты:

1. Вопросы расчетов взаимного затенения объектов (инсоляции) решены лишь для архитектурно-строительных задач. Решение таких задач осуществляется как с помощью средств механизации (солнечные линейки), так и посредством компьютерных программ.

2. Задача оптимизации размещения солнечных батарей на КЛА с математической точки зрения может быть описана как задача математического программирования.

3. На основании рецепторных геометрических моделей разработаны сканирующие алгоритмы вычисления площадей затенения поверхностей различного типа КЛА, а также модификации этих алгоритмов, учитывающих конструктивные особенности анализируемых КЛА.

4. Построение геометрической модели с использованием четырехзначной логики (рецепторов с кодами "0", "1", "2" и "3" является эффективным приемом, позволяющим разделить эффективную площадь поверхности как солнечных батарей КЛА, так и его основного корпуса.

5. Разработана основанная на методе сужающейся окрестности методика оптимизации совокупности конструктивных параметров компоновки внешних солнечных батарей по критерию их максимальной эффективности (минимальной затененности солнечных батарей как друг другом, так и другими конструктивными элементами КЛА).

6. Осуществлена программная реализация на языке С# предложенной в предыдущей главе рецепторной геометрической модели оценки эффективной площади освещения солнечных батарей.

7. Разработана графическая оболочка на языке С# с подключением графических библиотек этого языка, позволяющая визуализировать результаты проведенных расчетов.

8. Проведена верификация результатов работы геометрической модели и ее компьютерной реализации путем сравнения идеальной модели с заранее известными результатами и данными, полученными в результате расчета.

9. Результаты верификации показали, что точность расчетов по геометрической модели ожидаемо зависит от размера рецептора и при размере рецептора 5×5 см погрешность вычислений эффективной площади солнечных батарей площадью 30 м^2 составляет $0,1 \text{ м}^2$, что соответствует $0,33\%$.

10. Проведенная в рамках верификации оценка необходимого процессорного времени показала, что оно зависит от размера рецепторов, но для диапазона их размеров от 20 до 1 см изменяется для реальных КЛА в диапазоне от 0,5 до 6,93 сек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аведьян, А.Б. Компонировка самолетов. Под ред. М.Ю.Куприкова / А.Б.Аведьян, С.Ю.Бибииков, Л.В.Маркин и др. - М., Изд-во МАИ, 2012. - 296 с.
2. Алашкин, В.М. Бортовые источники питания ракетносителя «Протон-М» с литий - ионными аккумуляторами / В.М.Алашкин, А.Н.Кукушкин, П.И.Николенко, С.Д.Севрук и др. // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIV академических чтений по космонавтике. - М., Комиссия РАН. - 2010. - С. 91-92.
3. Алексеев, Г.В. Численное экономико-математическое моделирование и оптимизация / Г.В. Алексеев. - СПб.: Гиорд, 2014. - 272 с.
4. Аммерал, Л. Принципы программирования в машинной графике / Л. Аммерал; пер. с англ. В.А. Львова. - М., 1992. - 224 с.
5. Апресян, А. Теория переноса излучения / А. Апресян, Ю. А. Кравцов. - М.: Наука, 1983. - 216 с.
6. Архитектурная физика / Под ред. Н.В. Оболенского. — М.: Стройиздат, 1998. — 448 с.
7. Балабух, Л.И. Строительная механика ракет: учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов /Л.И.Балабух, Н.А.Алфутов, В.И.Усюкин. - М., Высшая школа, 1984. - 391 с.
8. Барабанов, Г.В. Летательные аппараты, использующие солнечную энергию или СВЧ энергию/ Г.В.Барабанов, А.П.Гальцев, В.Н.Титоренко, А.В.Шустов // Техника воздушного флота. - 1991. - № 1. - С. 22-29.
9. Бахарев, Д.В. Методы расчета и нормирования солнечной радиации в градостроительстве: дис. канд. техн. наук: 18.00.04 / Бахарев Деомид Вениаминович. - М., 1968. - 218 с.
10. Бахарев, Д.В. О нормировании и расчете инсоляции/ Д.В.Бахарев, Л.Н.Орлова // Светотехника. - 2006. - № 1. - С. 18-27.

11. Бахарев, Д.В. Использование ЭВМ при разработке энергетических методов расчета инсоляции в градостроительстве/ Д.В. Бахарев // В помощь проектировщику - градостроителю. - Киев: Будивельник. - 1969. - Вып.2. - С. 49 - 54.
12. Белова, И.М. Компьютерное моделирование / И.М. Белова. - М.: МГИУ, 2008. - 81 с.
13. Вальков, К. И. Вопросы использования методов геометрического моделирования / К. И. Вальков // Вопросы геометрического моделирования: сб. науч. тр. – Л., 1968. – Вып. 52. – С. 7–15.
14. Вальков, К. И. Лекции по основам геометрического моделирования / К. И. Вальков. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. – 180 с.
15. Ванке, В.А. Проблемы солнечных космических электростанций / В.А. Ванке, В.М.Лопухин, В.И.Саввин // УФН. - 1977. - Т. 123, - вып. 4. - С. 633-655.
16. Вермишев, Ю.Х. Методы автоматизированного поиска решений при проектировании сложных технических систем / Ю.Х.Вермишев. - М., Радио и связь, 1982. - 152 с.
17. Вермишев, Ю.Х. Основы автоматизации проектирования / Ю.Х.Вермишев. - М., Радио и связь, 1988. - 280 с.
18. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика / В.И.Виссарионов, Г.В.Дерюгина, В.А.Кузнецова, Н.К.Малинин. - М., Издательский дом МЭИ, 1996. - 276 с.
19. Власов, И.В. Расчёт индикатрисы излучателя/ И.В.Власов, В.И.Гук, В.С.Николаенко, И.Г. Паневин // Рабочие процессы в подсистемах энергосиловых установок. Тем. сб. науч. тр. МАИ. - М., - 1987. - С. 51-59.
20. Волков, Е.А. Численные методы/ Е.А.Волков. - М., Наука, 1987. - 248 с.
21. Волошин В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов / В.В.Волошин. - М., Машиностроение, 1991. - 256 с.
22. Вьюненко, Л.Ф. Имитационное моделирование: Учебник и практикум для академического бакалавриата / Л.Ф. Вьюненко, М.В. Михайлов, Т.Н. Первозванская. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 283 с.

23. Гаврилов, В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов / В.Н.Гаврилов. - М., Машиностроение, 1988. - 136 с.
24. Гардан, И. Машинная графика и автоматизация конструирования. Пер. с франц. / И.Гардан, М.Люка. - М., Мир, 1987. - 270 с.
25. Герасименко, Е.П. Минимизация вычислительного процесса при решении геометрических задач с помощью рецепторных матриц /Е.П.Герасименко, Д.М.Зозулевич // В кн.: ВТ в машиностроении. - Минск, ИТК АН БССР, - июнь, 1970. - С. 26 – 40.
26. Герасименко, Е.П. Методы формирования трехмерных рецепторных матриц на ЭВМ /Е.П.Герасименко, Д.М.Зозулевич // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. – Минск. ИТК АН БССР, 1971. - С. 24 – 31.
27. Глазков, А. Ф. Оценка видимости и определение очерковой поверхности при автоматическом изображении криволинейных объектов / А.Ф. Глазков, Е. Б. Рабинский // Прикладная геометрия и инженерная графика. – Киев: Будивельник. – 1975. – Вып. 20. – С.42-44.
28. Глухоедов, А.В. Компьютерная геометрия и графика: курс лекций/ А.В. Глухоедов. – Белгород: БГТУ, 2011. –117 с.
29. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование / Н. Н. Голованов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 472 с.
30. Голованов, Н.Н. Компьютерная геометрия: Учеб. пособие для студ. вузов / Н.Н. Голованов, Д.П. Ильютко, Г.В.Носовский, А.Т. Фоменко М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 512 с.
31. Голубева, Н.В. Математическое моделирование систем и процессов: Учебное пособие / Н.В. Голубева. - СПб.: Лань, 2013. - 192 с.
32. Горелик, А.Г. Автоматизация инженерно-графических работ с помощью ЭВМ А.Г. Горелик. - Минск, Высшая школа, 1980 г. - 206 с.
33. Горелик, А.Г. Об алгоритмическом построении теоретико-множественного описания геометрического объекта / А.Г.Горелик // Вычислительная техника в машиностроении. - Минск, ИТК АН БССР. - 1968. - № 2. - С. 36 - 49.

34. Горелик, А.Г. Методы геометрического моделирования при автоматизированном проектировании объектов сложной структуры: автореф. ... дисс. докт. техн. наук: 05.01.01 /Горелик Александр Гиршевич. –Минск, 1983.- 46 с.
35. Горлач, Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач, В.Г. Шахов. - СПб.: Лань, 2016. - 292 с.
36. Грегори, Д.Л. Различные подходы к проблеме производства энергии в космосе / Д.Л. Грегори // Ракетная техника и космонавтика. - 1979. - т. 17. - № 1. - С. 190-199.
37. Григорьев, С.Н. Построение воксельных моделей геометрических объектов / С.Н.Григорьев, М.А.Локтев, А.В. Толоч // Прикладная Информатика. - 2013. - № 4. - С. 50-55.
38. Грувер, М. САПР и автоматизация производства. Пер. с англ. / М.Грувер, Э.Зиммерс. - М., Мир, 1987. - 528 с.
39. Грилихес, В.А. Солнечная энергия и космические полеты / В.А.Грилихес, П.П.Орлов, Л.Б.Попов. - М., Наука, 1984. - 215 с.
40. Грилихес, В.А. Солнечные космические электростанции / В.А.Грилихес. - Л., Изд-во Наука, 1986. - 286 с.
41. Грилихес, В.А. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов / В.А.Грилихес, В.И.Матвеев, В.П.Полуэктов. - М.: Машиностроение, 1975. - 248 с.
42. Гусев, Н.М. Естественное освещение зданий / Н.М.Гусев. - М., Госстройиздат, 1961. - 218 с.
43. Дашкевич, Л.Л. Методы расчета инсоляции при проектировании промышленных зданий / Л.Л.Дашкевич. - М.-Л., Госстройиздат, 1939. -164 с.
44. Денискин, Ю.И. Прикладная геометрия. Научные основания и применение в технике / Ю.И.Денискин, Э.В.Егоров, Л.Г Нартова., М.Ю.Куприков. - М., Изд-во МАИ-Принт, 2010. - 385 с.
45. Джапаридзе, И. С. Начертательная геометрия в свете геометрического моделирования / И. С. Джапаридзе. – Тбилиси: Ганатлеба, 1983. – 298 с.

46. Дунаев, Б.А. Инсоляция жилых зданий / Б.А.Дунаев. - М., Госстройиздат, 1962. - 78 с.
47. Дунаев Б.А. Инсоляция жилища / Б.А.Дунаев. - М., Стройиздат. 1979. - 104 с.
48. Жирков, А.М. Математическое моделирование систем и процессов: Учебное пособие / А.М. Жирков, Г.М. Подопригора, М.Р. Цуцунава. - СПб.: Лань КПТ, 2016. - 192 с.
49. Зайдель, А.Н. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация: Учебное пособие / А.Н. Зайдель. - СПб.: Лань, 2016. - 304 с.
50. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: Учебник для вузов / В.С. Зарубин. - М.: МГТУ им. Баумана, 2010. - 496 с.
51. Захидов, Р.А. Теория и расчёт гелиотехнических концентрирующих систем / Р.А.Захидов, Г.А.Умаров, А.А.Вайнер. - Ташкент, Фан, 1977. - 144 с.
52. Зозулевич, Д.М. Машинная графика в автоматизированном проектировании / Д.М.Зозулевич. - М., Машиностроение, 1976. - 240 с.
53. Зозулевич, Д.М. Методы реализации на ЭЦВМ теоретико-множественных операций над плоскими многосвязанными областями / Д.М.Зозулевич, Д.Р.Шерлинг // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. - Минск, изд. НТК АН БССР. - 1969. - С. 26-35.
54. Зозулевич, Д.М. Выполнение на ЭЦВМ некоторых операций с трехмерными кусочно-заданными объектами/ Д.М.Зозулевич, Л. Г.Максимова // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. - Минск, изд. НТК АН БССР. - 1970. - С. 75-84.
55. Зозулевич, Д.М. Построение с помощью ЭЦВМ изображений трехмерных объектов, заданных кусочно-аналитическими моделями / Д.М.Зозулевич, Э.М.Ловчев // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. Минск. - Изд. НТК АН БССР - 1971. - С. 64 - 76.
56. Егер, С.М. Основы автоматизированного проектирования самолетов / С.М.Егер, Н.К.Лисейцев, О.С.Самойлович. - М., Машиностроение, 1986. - 232 с.

57. Егоров, Э.В. Моделирование поверхностей агрегатов ЛА / Э.В. Егоров, А.Д.Тузлов. - М., Изд-во МАИ, 1988. - 88 с.
58. Егоров, Э.В. Конструктивная геометрия / Э.В.Егоров, Л.Г.Нартова. - М., Изд-во МАИ, 2012. - 160 с.
59. Елизаров, И.А. Моделирование систем: Учебное пособие / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов. - Ст. Оскол: ТНТ, 2013. - 136 с.
60. Иванов, Г.С. Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований) / Г.С. Иванов. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
61. Иванов, Г.С. Теоретические основы начертательной геометрии: Учебное пособие / Г.С.Иванов. - М., Машиностроение, 1998. - 158 с.
62. Иванникова, Н.В. Геометрические модели, алгоритмы проектирования и поиска эффективных параметров рефлекторов технологического назначения: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.01.01 /Иванникова Наталия Владимировна. Нижний Новгород., НГГСА, 2017. - 19 с.
63. Казиев, В.М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем: Учебное пособие / В.М. Казиев. - М.: Бином, 2014. - 244 с.
64. Каратаев, В.А. Инсоляция помещений и территорий: Учеб. пособие./ В.А.Каратаев, Е.В.Адонкина, М.Г.Тен, С.А.Нефедова. - Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин), 2013. - 64 с.
65. Катасонов, А.В. Вокселизация функциональных форм / А.В Катасонов., С.И.Вяткин, Б.С. Долговесов // ГРАФИКОН-2005: Тр. Междунар. конф. - Новосибирск. - 2005. - С. 372-377.
66. Квасников, Л.А. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. Изд. второе, перераб. и доп. / Л.А.Квасников, Л.А.Латышев, Н.Н. Пономарев-Степной и др. - М., Изд-во МАИ, 2001. - 480 с.
67. Клишин В.В. Моделирование трехмерных объектов на основе объемных базовых элементов формы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01 /Клишин Валерий Викторович.- М.:, МЭИ, 1983, - 273 с.

68. Колтун, М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М.Колтун. - М., Наука, 1985. - 280 с.
69. Комков, В.А. Формируемые центробежными силами солнечные батареи / В.А. Комков, В.М.Мельников, Б.Н.Харлов. - М., Черос, 2007. - 188 с.
70. Корн Г.В. Методы формирования рецепторных геометрических моделей и их применение при решении инженерно-геометрических задач: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.01.01 /Корн Галина Васильевна. - М.:, МАДИ, 1990. - 22 с.
71. Корн Г.В. Применение рецепторных моделей при компоновке изделий авиационной техники. / Г.В.Корн // В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Интегрированные системы автоматизированного проектирования». М. - 1989. - С. 18-24.
72. Королев, А.Л. Компьютерное моделирование / А.Л. Королев. - М.: БИНОМ. ЛЗ, 2013. - 230 с.
73. Королев, А.Л. Компьютерное моделирование. Лабораторный практикум / А.Л. Королев. - М.: Бином, 2015. - 296 с.
74. Котов, И. И. Алгоритмы машинной графики / И. И. Котов – М.: Наука, 1975. – 94 с.
75. Котов, И.И. Алгоритмы конструирования каркасных поверхностей / И.И. Котов. – М.: МАИ, 1975. – 63 с.
76. Крысова, И.В Основы САПР: учеб. пособие / И.В. Крысова, М.Н. Одинец, Т.М. Мясоедова, Д.С. Корчагин. Омск: ОмГТУ, 2017. – 80 с.
77. Кудрин И.О. Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки / И.О.Кудрин. - М., Машиностроение, 1987. - 248 с.
78. Куи Мин Хан. Геометрические модели внешней компоновки солнечных антенн космических летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Куи Мин Хан // Электронный журнал "Труды МАИ". - 2015. - № 82.- Режим доступа <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=58836>.
79. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники [Электронный

ресурс] / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин, Е Вин Тун, Г.В. Корн // Электронный журнал "Труды МАИ". - 2016. - № 86. - Режим доступа <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=66465>.

80. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин // Электронный журнал "Труды МАИ", - 2017. - № 93. - Режим доступа <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=80474>.

81. Куи Мин Хан. Рецепторные модели в задачах автоматизированной компоновки техники / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин, Е Вин Тун, Г.В.Корн. - Саарбрюкен, изд-во Ламберт, 2016. - 110 С.

82. Куи Мин Хан. Оптимизация размещения солнечных батарей на космических станциях / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин // Сб. тезисов конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2014", М., МАИ. - 22-24 апреля 2014 г. - С. 114 - 115.

83. Куи Мин Хан. Геометрические модели компоновки солнечных батарей на космических станциях / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин // Сб. тезисов конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2015", М., МАИ. - 21-23 апреля 2015 г. - С. 256 - 257.

84. Куи Мин Хан. Автоматизация компоновки солнечных батарей и концентраторов в ракетно-космической технике / Куи Мин Хан // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2015", М.: МАИ. - 17-21 июня 2015 г. - С. 233-234.

85. Куи Мин Хан. Компьютерное моделирование внешней компоновки солнечных батарей космических летательных аппаратов / Куи Мин Хан // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2016", М., МАИ, 12-15 апреля 2015 г. - Том 2. - С. 67 - 68.

86. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ", , 2017, № 93.

87. Куи Мин Хан. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов / Куи Мин Хан, Л.В.Маркин // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2017", М. - МАИ. - 5-19 апреля 2017 г. - С. 1454.

88. Куц, О.К. Расчёт зеркальных светильников на ЭВМ с использованием сплайнов / О.К.Куц, Н.Н. Софронов // Светотехника. - 1985. - № 12. - С.19-21.
89. Куц, О. К. Интегрированная концепция расчета и проектирования зеркальных отражателей на ЭВМ / О. К. Куц, Д. Ю. Чепелевский // Светотехника. – 1995. – С.25-28.
90. Куц, О. К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ / О. К. Куц. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 150 с.
91. Куц, О. К. Прямая и обратная задачи в расчетах светооптических систем световых приборов – компьютерная реализация : дис. ... док. тех. наук : 05.09.07 / Куц Олег Константинович. – М., 1999. – 242 с.
92. Леонов, В.В. Анализ особенностей конструкции крупногабаритных надувных концентраторов солнечного излучения / В.В.Леонов, И.С.Жаренов // Наука и образование. - № 10. - 2013. - С 177-192.
93. Леонов, В.В. Радиационный теплообмен в зеркальных концентрирующих системах / В.В.Леонов. - Саарбрюкен, LAP, 2012. - 180 с.
94. Локтев, М.А. Построение воксельных моделей геометрических объектов / С. Н. Григорьев, М.А. Локтев, А. В. Толоч // Прикладная информатика. – 2013. – № 4. – С. 50-56.
95. Локтев М. А. Функционально-воксельный метод в решении задачи поиска пути. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Нижний Новгород., НГГАСУ, 2014, - 26 с.
96. Лоторевич, Е.А. Воксельно-математическое моделирование при решении задач определения площади для поверхностей деталей / Е. А. Лоторевич, Д.А. Силантьев, С.А. Пушкарев, А.В. Толоч // Информационные технологии в проектировании и производстве. – М., 2013. – № 3. – С. 29-33.
97. Лоторевич, Е.А. Геометрические преобразования пространства функционально-воксельной модели. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2016, - 20 с.

98. Лоторевич, Е.А. Автоматизация графического способа решения некоторых математических задач / С.Н. Григорьев, А.В. Толок, Е.А. Лоторевич и др. // Прикладная информатика. – М., 2012. – № 5. – С. 44-50.
99. Лоторевич Е. А. Принципы пространственной визуальной компоновки аналитических моделей, отображённых в воксельном графическом пространстве / Е. А. Лоторевич // Технология машиностроения. – 2013. – №11(137) — С. 59-63.
100. Любченко, А.М. Інсоляція і орієнтація будинків / А.М.Любченко. - Киев, "Будівельник", 1970.
101. Максимей, И. В. Имитационное моделирование сложных систем. В 3 частях. Часть 1. Математические основы. / И.В. Максимей. - М., БГУ - Москва, 2009. - 264 с.
102. Мальчевский, В.В. Автоматизация процесса компоновки самолета: Учебное пособие для ФПК / В.В.Мальчевский. - М., МАИ, 1987. - 42 с.
103. Маркин, Л.В. Геометрическое моделирование задач автоматизации размещения / Л.В.Маркин // Прикладная геометрия, инженерная графика, компьютерный дизайн. - № 1 (11). - 2007. - С. 9-18.
104. Математика и САПР: В 2-х кн. Кн. I. Пер. с франц./Шенен П., Гардан И. и др. - М.: Мир, 1988. - 204 с.
105. Михайленко, В.Е. Инженерная геометрия с элементами теории параметризации / В.Е.Михайленко, С.Н.Ковалёв, Н.И.Седлецкая и др. - Киев, УМК ВО, 1989. - 83 с.
106. Михайленко, В.Є. Інженерна та комп'ютерна графіка: Підручник; За ред. В. Є. Михайленка / В.Є.Михайленко, В. М.Найдиш, А.М.Підкоритов, І.А.Скидан. - Киев, Вища шк., 2000. - 342 с.
107. Михайленко, В.Є. Нарисна геометрія / В.Є.Михайленко, М.Ф.Євстифеев, С.М.Ковальов, О.В.Кашенко. - Киев, Вища шк. 1993. - 271 с.
108. Мишин, В.П. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов / В.П.Мишин, М.И.Осин. - М., Машиностроение, 1978. - 128 с.

109. Медведский, А.Л. Геометрическое моделирование авиационно-ракетных изделий [Электронный ресурс] / А.Л.Медведский, Л.Н.Рабинский, А.С.Курбатов // Электронный журнал “Прикладная геометрия”. - Вып. 11 - № 22 (2009). - с. 79-87. Режим доступа http://www.apg.mai.ru/Volume11/Number22/vol11num22_4.pdf
110. Мельников, В.М. Солнечные батареи нового поколения для космических электростанций в проблеме энергетического кризиса и управления погодой, освоения Луны и полета на Марс / В.М.Мельников, В.А.Комков, Б.Н. Харлов // III-я Международная научно-техническая конференция «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ОБРАЗОВАНИИ». - Абхазия. - 19-23 сентября 2007 г. - С. 12 - 19.
111. Мельников, В.М. Бескаркасная космическая солнечная батарея / В.М.Мельников, В.А.Комков, Г.В. Кабдулин // Полет. - Изд. Машиностроение. - №7. - 2005. - С.43 - 49.
112. Митрофанова, С. А. Решение плоской задачи аппарата отражения при заданной каустике / С. А. Митрофанова // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. тр. – Симферополь : НАПКС, 2011. – Вып. 36. – С. 128-131.
113. Митрофанова, С. А. Компьютерная модель каустики для переменного направления солнечных лучей / С.А. Митрофанова // Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну (спецвыпуск). – К. : ДОП КНУТД, 2006. – С. 160-164.
114. Мхитарян, Е.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников / Е.М. Мхитарян - Киев, Наук. думка, 1999. - 321 с.
115. Наджаров, К.М. Алгоритм и программа расчёта массово-инерционных параметров тел сложной переменной формы методом линейчатого шестигранника: Учебное пособие под ред. В.И.Якунина / Наджаров К.М. - М., Изд. МАИ, 1982. - 42 с.
116. Наджаров К.М. Матричная стереометрия и геометрия масс тел переменной формы в проектировании самолёта: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.01.01 /Наджаров Константин Михайлович. - М.: 1983. - 34 с.

117. Наджаров, К.М. Теоретические основы формирования моделей поверхностей / К.М.Наджаров, Э.В.Егоров, В.И.Якунин. - М., МАИ, 1985. - 78 с.
118. Нариманов, Е.А. Космические солнечные электростанции / Е.А. Нариманов. - М., Знание, 1991. - 64 с.
119. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования/ И.П.Норенков. - М., Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 336 с.
120. Ньи, Н.Х. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. / Х.Н. Ньи. – М., 2014. – 180 с.
121. Ньи, Н.Х. Применение рецепторных геометрических моделей в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники [Электронный ресурс] / Н.Х. Ньи, Л.В. Маркин, А.А. Соседко // Электронный журнал "Труды МАИ". – 2014. – № 72. – Режим доступа: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=47438>
122. Оболенский, Н.В. Архитектура и Солнце / Н.В.Оболенский. - М., Стройиздат, 1988. - 208 с.
123. Оноприйко, М. Д. Реконструкция поверхностей геометрических моделей, представленных дискретным множеством цифровых данных : дис. ... канд. тех. наук : 05.01.01. / Оноприйко Марина Дмитриевна. – Н. Новгород, 2003. – 124 с.
124. Орлова, Л.Н. Радиационная модель безоблачной атмосферы в оптическом диапазоне спектра / Л.Н. Орлова // Светотехника. - 1993. - №2. - С.1 - 4.
125. Орлова, Л.Н. Метод энергетической оценки и регулирования инсоляции на жилых территориях: дис. ... канд. техн. наук: 18.00.04 /Орлова Людмила Николаевна. - М., МИСИ. 1985. - 188 с.
126. Осин, М.И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов / М.И.Осин. - М., Машиностроение, 1984. - 168 с.
127. Осипов, В.А. Теоретические основы формирования системы машинной геометрии и графики / В.А. Осипов. – М.: МАИ, 1983. – 34 с.
128. Павловский, Ю.Н. Имитационное моделирование / Ю.Н.Павловский, Н.В.Белотелов, Ю.И.Бродский. - М., Академия - Москва, 2008. - 240 с.

129. Пащенко, О.Б. Компоновка оборудования маневренного самолета на базе матрично-топологического метода: 05.07.02 / Пащенко Олег Борисович. - автореф. дисс. ... канд. техн. наук: . - М.: МАИ. - 1990. - 22 с.
130. Пащенко, О.Б. Автоматизированная компоновка оборудования в фюзеляже маневренного самолета / О.Б. Пащенко // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 1990. - № 4. - С. 111-113.
131. Пащенко, О.Б. Метод формирования компоновочной схемы радиоэлектронного оборудования на борту маневренного самолета / Пащенко О.Б. // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 1991. - № 2. - С. 64 - 66.
132. Погорелов, А.В. Геометрия / А.В.Погорелов. - М., Наука, 1984. - 268 с.
133. Полозов, В.С. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи / В.С. Полозов, О.А. Будеков, С.И. Ротков и др. — М.: Машиностроение, 1983. — 280 с.
134. Похвалинский, А.Б. Геометрическое моделирование трехмерных объектов методом конструктивной геометрии / А.Б.Похвалинский // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по проблемам машинной графики. - Протвино. - 1987. - С 108- 126.
135. Похвалинский, А.Б. Средства геометрического моделирования трехмерных объектов в САПР: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.12 /Похвалинский Андрей Борисович. - Киев, КИСИ, 1986. - 24 с.
136. Прохоров А.Ф. Конструктор и ЭВМ / А.Ф.Прохоров. - М., Машиностроение, 1987. - 272 с.
137. Принс, М. Машинная графика и автоматизация проектирования. Пер. с английского / М.Принс. - М., Сов. радио, 1975. - 280 с.
138. Райкунов, Г.Г. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции / Г.Г.Райкунов, В.А.Комков, В.М.Мельников, Б.Н.Харлов. - М., ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 448 с.
139. Райкунов, Г.Г. Орбитальные солнечные электростанции как перспективный путь решения энергетических и экологических проблем / Г.Г. Райкунов, В.М. Мельников, А.С.Чеботарёв и др. // Теплоэнергетика. - №11. - 2011. - С. 33-38.

140. Райкунов, Г.Г. Проблемы создания космических солнечных электростанций (КСЭС) мощностью 1-10 ГВт, транслирующих энергию на Землю / Г.Г. Райкунов, В.М. Мельников, А.С. Чеботарёв и др. // Наука и технологии в промышленности. - №3. - 2011. - С. 69-73.
141. Рвачев, В.Л. Геометрические приложения алгебры логики / В.Л.Рвачев. - Киев, Техника, 1967. - 213 с.
142. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В.Л.Рвачев. - Киев, Наукова думка, 1982. - 552 с.
143. Ревзина, Н. В. Геометрическое моделирование рефлектора по заданному пучку отраженных лучей / С. Н. Литунов, Н. В. Ревзина, В. Ю. Юрков // Вестник Омского университета им. Ф.М. Достоевского. – Омск : Изд-во ОмГУ, №2, 2015. – С. 11-14.
144. Реквиша, А.А.Г. Булевы операции при объемном моделировании. Алгоритмы определения и соединения границ / А.А.Г.Реквиша, Г.Б.Воулкер. // ТИНЭР. - 1985. - № I. - С. 32-49.
145. Рефлекторы [Электронный ресурс] / Drukmarket UV-technology, 2015. – Режим доступа : <http://www.drukmarket.com.ua/ru/catalog/uf-komplektuyuchi/reflektory/reflektory>
146. Рогоза, Ю.А. Задание геометрических объектов в дискретном пространстве / Ю.А.Рогоза. - М., МАИ. - 1989. - 16 с. - Депонировано. в ВИНТИ 27.12.89. №7690-В-89.
147. Рогоза Ю.А., Сморгачев Э.К. Об одной модели в позиционных задачах инженерной графики / Ю.А.Рогоза, Э.К.Сморщков. - Омский политехнический институт. - Омск: 1988. - 6 с. - Депонировано. в ВИНТИ 21.02.89 №1110-В-89.
148. Роджерс, Д.Ф. Алгоритмические основы машинной графики/ Д.Ф. Роджерс. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
149. Ротков, С.И. Анализ некоторых систем геометрии и графики пространственных объектов. / С.И.Ротков // В сб. Проблемы информационных систем. - М., МЦНТИ. - 1988. - Т.5. - С. 76.

150. Ротков, С.И. Теоретико - множественные операции над многогранными объектами сложных структур. / С.И.Ротков , Н.А.Шишова // В сб. Автоматизация обработки сложной графической информации. - Горький. - 1987. - С. 50
151. Рудницкий, А.Н. Быстрый расчет инсоляции в архитектурном проектировании с помощью графиков / А.Н.Рудницкий // Строительство и архитектура. - 1957. № 1. - С. 7 -11.
152. Рыжов, Н.Н. Параметрическая геометрия: учебное пособие / Н.Н. Рыжов. – М.: МАДИ, 1988. – 56 с.
153. Самойловский, А.А. Методика определения основных проектных параметров беспилотных летательных аппаратов, использующих для полета энергию солнечного излучения / А.А.Самойловский, Н.К.Лисейцев // Вестник Московского авиационного института. - 2015. - Т 22. - №3. - С. 7-16.
154. СанПиН 2.2.1/2.1.1.J.1076-01 «Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий». -М., Минздрав России. - 2002. -15 с.
155. Семенков, О.И. Введение в системы автоматизации проектирования / О.И.Семенков. - Минск, Наука и техника, 1979. - 85 с.
156. Сидоренко, С.М. Вычислительная геометрия в машиностроении / С.М.Сидоренко. - М., Машиностроение, 1983г. 160 с.
157. Силантьев, Д. А. Воксельно-математическое моделирование при решении задач определения площади для поверхностей деталей / Д. А. Силантьев, Е. А. Лоторевич, С. А. Пушкарёв, А. В. Толок // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2013. – №3. – С. 29-33.
158. Сирота, А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. / А.А. Сирота. - М.: Техносфера, 2006. - 280 с.
159. Ситу Лин. Разработка методов и геометрических моделей анализа незаполненных пространств в задачах размещения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.01.01 /Ситу Лин. М.: МАИ. - 2011. - 24 с.

160. Ситу Лин. Рецепторные геометрические модели в задачах автоматизированной компоновки технического отсека легкого самолета [Электронный ресурс] / Ситу Лин, Н.Н.Хтун, Л.В. Маркин // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. № 47. Режим доступа <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=26825>
161. Ситу Лин. Разработка математического и программного обеспечения для автоматизированной компоновки незаполненных пространств / Ситу Лин // Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2011» . – М.: Изд-во МЭЙЛЕР. - С.112.
162. Скребушевский, Б.С. Космические энергетические установки с преобразованием солнечной энергии / Б.С.Скребушевский. - М., Машиностроение, 1992. - 224 с.
163. Смирнов, О.Л. САПР: формирование и функционирование проектных модулей / О.Л.Смирнов, С.Н.Падалко, С.А.Пиявский. - М., Машиностроение, 1987. - 272 с.
164. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов. - М., Высшая школа, 2003. - 242 с.
165. Стародетко, Б.А. Геометрическое интерполирование и аппроксимация / Б.А. Стародетко // В кн. "Автоматизация процессов проектирования". Минск, ИТК АН БССР. - 1978. - Вып. 3. - С. 3-15.
166. Стародетко, Е.А. Методы описания и преобразования геометрической информации в автоматизированных системах технической подготовки производства: автореф. дисс. . доктора техн. наук: 05.01.01 /Стародетко Евгений Александрович. –Минск, ИТК АН БССР. - 1974. - 42 с.
167. Стародетко, Е.А. Математическое моделирование лекальных поверхностей / Е.А.Стародетко. - Минск, Наука и техника, 1984. - 126 с.
168. Стародетко Е.А. Элементы вычислительной геометрии / Е.А.Стародетко. - Минск, Наука и техника, 1986. - 239 с.

169. Стоян, Ю.Г. Решение некоторых многоэкстремальных задач методом сужающихся окрестностей / Ю.Г. Стоян, В.З.Соколовский. - Киев, Наукова думка, 1980. - 206 с.
170. Стоян, Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю.Г.Стоян, С.В.Яковлев. - Киев, Наукова думка, 1986. - 266 с.
171. Стоян, Ю.Г. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов / Ю.Г.Стоян, Н.И.Гиль. - Киев, Наукова думка, 1976. - 249 с.
172. Стоян, Ю.Г. Автоматизация проектирования компоновки оборудования летательных аппаратов / Ю.Г.Стоян, Е.Н.Кулиш. - М., Машиностроение, 1984. - 192 с.
173. Суханов, И.С. Лучистая энергия солнца и архитектура / И.С.Суханов. - Ташкент, Фан, 1973. - 224 с.
174. Тевлин, А.М. Перспектива развития и взаимосвязи методов механики и прикладной геометрии поверхностей / А.М. Тевлин // Вопросы машинного проектирования и инженерной графики. – М., 1980. – Вып. 512. – С. 7 – 9.
175. Тестоедов, Н.А. Анализ основных концепций крупногабаритных трансформируемых космических рефлекторов / Н.А.Тестоедов, В.И.Халиманович, А.И. Величко и др. // XVI Международная научная конференция «Решетнёвские чтения». - Железногорск. - 2013. - С. 92 - 93.
176. Толок, А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / А.В.Толок. - М., ФИЗМАТЛИТ, 2016. - 112 с.
177. Толок, А. В. Графические образы-модели в информационных технологиях / А. В. Толок // Прикладная информатика. – 2009. – №4 . – С.31-40.
178. Толок, А. В. Применение воксельных моделей в процессе автоматизации математического моделирования / А. В. Толок // Автоматика и телемеханика. – 2009. – №. 6. – С. 167-180.
179. Толок А.В. Метод функциональной вокселизации полигональных объектов на основе математического аппарата R-функций / М.А. Локтев, А.В. Толок // Прикладная информатика. – М., 2016. – Т. 11. – С. 127-134.

180. Трембач, В. В. Физическое и математическое моделирование световых приборов / В. В. Трембач. – М.: Энергия, 1975. – 144 с.
181. Шорин, С.Н. Световое моделирование лучистого теплообмена / С.Н.Шорин, Г.Л.Поляк, И.П. Колченогова и др. // Теплопередача и тепловое моделирование. - № 3. - М.: Изд. АН СССР. - 1959. - С. 365-418.
182. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука / Р.Шеннон. - М., Мир, 2010. - 418 с.
183. Шпур, Г. Автоматизированное проектирование в машиностроении. Пер. с немецкого/ Г.Шпур , Ф.-Л.Краузе. - М., Машиностроение, 1988. - 648 с.
184. Штейнберг, А.Я. Расчет инсоляции зданий / А.Я.Штейнберг. - М., Стройиздат. 1975. - 117 с.
185. Штейнберг, А.Я. Принципы нормирования и методы контроля условий инсоляции школьных зданий / А.Я.Штейнберг. - М., Медицина, 1965. - 142 с.
186. Штейнберг, А.Я. Принципы нормирования и новые методы оценки инсоляции школьных зданий / А.Я.Штейнберг // Строительство и архитектура. - 1965. - Вып. 11. - Киев, "Будівельник". - С. 24 - 28.
187. Штейнберг, А.Я. Методы оценки условий инсоляции объектов с помощью "солнечных транспортеров" / А.Я.Штейнберг // Сборник "Вопросы архитектуры". - Изд-во харьковского университета. - Харьков. - 1966. - С. 12 - 19.
188. Хейфец, А.Л. Расчет продолжительности инсоляции средствами 3D моделирования пакета AutoCAD / А.Л.Хейфец // Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование. - Сб. научн. тр. -Екатеринбург, ГОУ ВПЛ "УГТУ-УПИ". - 2004. - Вып. 7. - № 11 (41). - С 211-214.
189. Хейфец А.Л. Система автоматизированного расчета продолжительности инсоляции / А.Л.Хейфец // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Строительство и архитектура. - вып. 14 (86). - 2007. - С. 51-54.
190. Хейфец А.Л. 3D-моделирование и расчет продолжительности инсоляции средствами пакета AutoCAD / А.Л. Хейфец // The 14-th International Conference on

- Computer Graphics and Vision. GraphiCon '2004. September 6-10. 2004. Moscow, Russia. - Moscow State University. Conference Proceedings. С. 283-286.
191. Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
192. Фролов, С.А. Кибернетика и инженерная графика / С.А.Фролов. - М., Машиностроение, 1974 г. - 200 с.
193. Четверухин, Н.Ф. Прикладная геометрия и некоторые вопросы ее развития / Н.Ф. Четверухин // Прикладная геометрия и инженерная графика. К., 1969. – Вып. 8. – С. 3 – 6.
194. Якунин, В.И. Теоретические основы формирования моделей поверхностей: Учебное пособие / В.И. Якунин и др. – М.: МАИ, 1985. – 52 с.
195. Aho.A, Hopcroft J.E, Ullman.J. Data Structures and Algorithms. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1983.
196. Artzy E., Frieder G., Herman G.T. The Theory, Design, Implementation and Evaluation of a Three-Dimensional Surface Detection Algorithm // Computer Graphics and Image Processing, Vol. 15, Jan. 1981, pp.1-24.
197. Balanis C.A., Antenna Theory, Analysis and Design. New York: John Wiley and Sons, 2000.
198. Bartz D., Meissner M. Voxels versus polygons: A comparative approach for volume graphics. In Volume Graphics '99, International Workshop Proceedings, Swansea, U.K., May 1999.
199. Bernhard Keidel. Auslegung und Simulation von hochfliegenden, dauerhaft stationierbaren Solardrohnen: PhD Thesis, Lehrstuhl für Flugmechanik und Flugregelung, Technische Universität München, 2000, 25 p.
200. Blum, H . Blum.H.// In W. Wathen-Dunn,. A transformation for extracting new descriptors of shape // MIT Press. – 1967. – P. 362-380.
201. Breen D.E., Mauch.S , Whitaker.R. 3D scan conversion of csg models into distance, closest-point and colour volumes // Vol. Graphics, 2000pp: 135-158.

202. Brown S., Quarato J., Chang N., Wright J., Malpass J., Thursby W., Hester J. Voxel Based IR Target Signature and Scene Generation. // Proceedings of Ground Target Modeling and Validation Conference, 1991-April, pp. 89-103.
203. Cadogan D.P., Scarborough S.E. Rigidizable Materials for use in Gossamer Space Inflatable Structures // Proc. 42nd AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference & Exhibit, 2001. AIAA-2001-1417.
204. Chen Michael, Mountford S. Joy, Sellen Abigail. A study in interactive 3-D rotation using 2-D control devices // ACM SIGGRAPH Computer Graphics, v.22 n.4, , Aug. 1988, p.121-129.
205. Christiansen H.N., Sederberg T.W. Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics // Computer Graphics (Proc. Siggraph 78), Vol. 12, No. 3, Aug. 1978, pp. 187-192.
206. Cignoni P., Marino P., Montani C., PUPPO E., Scopigno R.. Speeding up isosurface extraction using interval trees. // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3(2), April 1997, pp. 158 - 170.
207. Cohen D., Kaufman A. 3D Scan-Conversion Algorithms for Linear and Quadratic Objects. Volume Visualization // IEEE Computer Society Press, 1990, pp. 280-301.
208. Cohen D., Kaufman A. Scan-Conversion Algorithms for Linear and Quadratic Objects // IEEE Computer Society Press, 1990, pp. 181-202.
209. Cohen-or, Kaufman.A. 3D line voxelization and connectivity control // IEEE CG Appiled, 1997, vol. 17, pp. 80-87.
210. Cook L.T., Dwyer S.J., Batnitsky S., Lee K.R. A Three-Dimensional Display System for Diagnostic Imaging Applications // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 3, No. 5, Aug. 1983, pp. 13-19.
211. Croft.H.T, Falconer.K. J,Guy.R. K. // New York: Springer-Verlag, p. 2, 1991. <http://www.amazon.com/exec/obidos/ASIN/0387975063/ref=nosim/ericstreasuretro>
212. Dachille.F, Kaufman .A,. Incremental triangle voxelization // Proc. Graphics Interface, 2000, pp: 205-212.

213. Danielsson P.E. Incremental Curve Generation // IEEE Trans. Computers, vol. C-19, 1970, pp. 783-793.
214. Devich R.N., Weinhaus F.M. Rural Image Perspective Transformations // Proceedings of SPIE, vol. 303, , 1981, pp. 54-66.
215. Dong Z., Chen W., Bao H., Zhang H., Peng Q. Real-time voxelization for complex polygonal models.// Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'04), October 6-8, 2004, Hangzhou, Chinapp, pp: 43-50.
216. Doctor L.J., Torborg J.G. Display Techniques for Octree-Encoded Objects // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 1, No. 3, July 1981, pp. 29-38.
217. Drebin R.A., Carpenter L., Hanrahan P. Volume Rendering // Computer Graphics, vol. 22, no. 4, Aug. 1988, pp. 65-74.
218. Ebert D.S., Parent R.E. Rendering and Animation of Gaseous Phenomena by Combining Fast Volume and Scanline A-buffer Techniques // Computer Graphics, vol. 24, no. 4, pp. 367-376, Aug. 1990.
219. Eisemann E., Decoret X. Fast scene voxelization and applications. // Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, March 2006, pp. 14-30.
220. Fang S., Liao D. Fast csg voxelization by frame buffer pixel mapping. // Proceedings of the ACM/IEEE Volume Visualization and Graphics Symposium, October 9-10, 2000, Salt Lake City, Utah, pp: 43-48.
221. Fan W., Harold M., Wu J., Mok B. Space based solar power. // Industry and Technology Assessment. Abstract. 6/2/2011. 37 p.
222. Foley J., Van Dam A., Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Mass., Reading: Addison-Wesley, 1982.
223. Foley J. Computer Graphics: Principles and Practice, Mass., Reading: Addison-Wesley, 1990.
224. Frieder G., Gordon D., Reynolds R.A. Back-to-Front Display of Voxel-Based Objects // Tech. report MIPG89, Dept. of Radiology, Univ. of Pennsylvania, Aug.1984.
225. Frieder G., Gordon D., Reynolds R. Back-to-front display of voxel-based objects. // IEEE Computer Graphics & Applications, 5(1):52.60, January 1985.

226. FRIEDER G ; GORDON D ; REYNOLDS R A. Back-to-front display of voxel-based objects // IEEE COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS, vol. 5, no. 1, January 1985 (1985-01), pages 52-60.
227. Fuchs H., Abram G.D., Grant E.D. Near Real-Time Shaded Display of Rigid Objects // Computer Graphics (Proc. Siggraph 83), Vol. 17, No. 3, July 1983, pp. 65-72.
228. Fuchs H., Kedem Z.M., Naylor B.F. On Visible Surface Generation by A Priori Tree Structures // Computer Graphics (Proc. Siggraph 80), Vol. 14, No. 3, 1980, pp. 124-133.
229. Fujimoto.A, Tanaka. T, Iwata.K , "ARTS: Accelerated Ray-Tracing System" // IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 6, no. 4, pp. 16-26, Apr. 1986.
230. Glassner .A. S. Space Subdivision for Fast Ray Tracing // IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 4, no. 10, pp. 15-22, Oct. 1984.
231. Goerss .R. H. Computer Analysis of Satellite Thermal Behavior. // Spacecraft and Space Systems, Radio Corp. her., 1966, pp. 30-33.
232. Gordon .D., Reynolds R.A. Image Space Shading of Three-Dimensional Objects //Tech. report MIPG85, Dept.of Radiology, Univ. of Pennsylvania, Nov. 1983. (To be published in Computer Vision, Graphics and Image Processing.)
233. Gordon .D., Udupa J.. Fast surface tracking in three-dimensional binary images. //Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1989, 45:196.214.
234. Haumont D., Warzee N. Complete polygonal scene voxelization. // ACM J. Graphics Tools, 2002, № 7 pp. 27-42.
235. Herman G.T., Reynolds R.A., Udupa J.K. Computer Techniques for the Representation of Three-Dimensional Data on a Two-Dimensional Display // Proc. SPIE, Vol. 367, 1982, pp. 3-14.
236. Huang.J, Yagel .R, Filippov .V, Kurzion.Y. An accurate method for voxelizing polygon meshes.//Volume Visualization, 1998. IEEE Symposium on. – IEEE, 1998. – P. 119-126.

237. Huang J., Yagel R., Filippov V., Kurzion Y. An accurate method for voxelizing polygon meshes. // Proceedings of the Symposium on Volume Visualization, October 19-20, 1998, Chapel Hill, North Carolina, USA., pp: 119-126.
238. Hunter G.M. Efficient Computation and Data Structures for Graphics. PhD dissertation, Dept. of Electrical Eng. and Comp. Sci., Princeton Univ., June 1978.
239. Iverson K.E. A Programming Language. - New York: Wiley, 1962, p. 12.
240. Iving .F.G., Morgan D. The feasibility of an aircraft propelled by solar energy. // Cambridge, Massachusetts, 1974, AIAA № 74-1042, 1974, pp. 1-9.
241. John C.M. Space Solar Power: The First International Assessment of Space Solar Power: Opportunities, Issues and Potential Pathways Forward. - Paris: International Academy of Astronautics, 2011. - 272 p.
242. Jones M.W. The production of volume data from triangular meshes using voxelisation. // Computer Graphics Forum., 15, 1996.-pp. 311-318.
243. Kajiya J.T., Kay T.L. Rendering Fur with Three-Dimensional Textures // Computer Graphics, vol. 23, no. 3, , July 1989, pp. 271-280.
244. Kaufman A. An Algorithm for 3D Scan Conversion of Polygons // Proc. Eurographics 87, pp. 197-208, 1987-Aug.
245. Kaufman .A. Efficient Algorithms for 3D Scan-Conversion of Parametric Curves Surfaces and Volumes // Proceedings of SIGGRAPH, vol. 21, no. 4, pp. 171-179, 1987-July.
246. Kaufman .A. An Algorithm for 3D Scan-Conversion of Polygons // Proceedings EUROGRAPHICS, pp. 197-208, 1987-August.
247. Kaufman.A, Shimony E. 3D Scan-Conversion Algorithms for Voxel-Based Graphics. // Proc. ACM Workshop Interactive 3D Graphics, pp. 45-76, 1986.
248. Kaufman A., Shimony E. 3D scan-conversion algorithms for voxel-based graphics. // Proceedings of ACM Workshop on Interactive 3D Graphics, October 23-24, 1986, Chapel Hill, North Carolina, pp: 45-76.
249. Kaufman A., Cohen D., Yagel R. Volume graphics. // Computer, no. 26, 1993, pp. 51-64.

250. Kaufman A. Efficient algorithms for 3d scan-conversion of parametric curves, surfaces and volumes. // Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Volume 21, July 1987, New York, USA., pp: 171-179.
251. Klesh A.T., Kabamba P.T. Solar-powered aircraft: energy-optimal path planning and perpetual endurance. // Journal of guidance, control and dynamics, 2009, № 32, p. 1320-1329.
252. Koroteev A.S., Koctylev A.M., Tverscoy V.S. Prospects of application of solar arrays with concentrators on near- Earth orbits. 1-st international conference on Solar power sattalites. France, Paris, 1991, p. 424-429.
253. Kreider J.S., Kreith F. Solar heating and cooling: engineering, practical design, and economics. - Washington: Hemisphere publishing company, 1977, 342 p.
254. Lee Y.T., G. Requicha A.A. Algorithms for Computing the Volume and Other Integral Properties of Solids: I - Known Methods and Open Issues; II - A Family of Algorithms Based on Representation Conversion and Cellular Approximation. // Comm. ACM, vol. 25, no. 9, Sept. 1982, pp. 635-650.
255. Levoy M. Display of Surfaces from Volume Data // IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 8, no. 3, May 1988, pp. 29-37.
256. Levoy M. Efficient ray tracing of volume data. //ACM Trans. on Graphics, 9(3):, July 1990, pp. 245 - 261.
257. McShan D.L., Silverman A., Lanza D.M., Reinstein L.E., Glicksman A.S. A Computerized Three-Dimensional Treatment Planning System Utilizing Interactive Color Graphics // British J. Radiology, Vol. 52, 1979, pp. 478-481.
258. Meagher D.J. Geometric Modeling Using Octree Encoding. // Computer Graphics and Imuge Processing, June 1982, vol. 19, no. 2, pp. 129-147.
259. Meagher D. Geometric Modelling Using Octree Encoding // Computer Graphics and Image Processing, Vol.19, 1982, pp. 129-147.
260. Mokrzycki W. lgorithms of Discretization of Algebraic Spatial Curves on Homogeneous Cubical Grids // Computers and Graphics, vol. 12, no. 3/4, 1988, pp. 477-487.

261. Noth A. Design of solar powered airplanes for continuous flight, for the degree of doctor of technical sciences. - Zurich, ETH, 2008, 196 p.
262. Oomes S., Snoeren P., Dijkstra T. 3d shape representation: Transforming polygons into voxels. // Proceedings of the 1st International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision, July 2-4, 1997, Springer Verlag, pp: 349-352.
263. Onate E., Kroplin B. (eds. Textile composites and inflatable structures II). DOI: 10.1007/978-1-4020-6856-0 .Computational Methods in Applied Sciences; vol. 8.Berlin: Springer, 2008. 272 p.
264. Perlin K., Hoffert E.M. Hypertexture // Computer Graphics, vol. 23, no. 3, , July 1989, pp. 253-262.
265. Pointer M., Sweeting M.N. Antennas for modern small satellites // IEEE Antenna and Propagation Magazine, vol. 51, , Aug. 2009, pp. 21–30.
266. Qineti.Q. Разработчика самолета Zephyr (дата обращения 15.05.2014). URL: <http://www.qinetiq.com/Pages/default.aspx>
267. Quarato J., Brown S., Chen C., Nguyen K., Malpass J., Thursby W., Hester J. Voxel Terrain Material Database and Synthetic IR Scene Generation. // Proceedings of Ground Target Modelling and Validation Conference, , 1991-April, pp. 68-88.
268. Raikhlin A.V. Modeling of processes // Kazan : KSTU - Moscow , 2012. p 320.
269. Reynolds R.A. Some Architectures for Real-Time Display of Three-Dimensional Objects: A Comparative Survey. // Tech. report MIPG84, Dept. of Radiology, Univ. of Pennsylvania, Oct. 1983.
270. Rigidizable Structures & Technologies // ILC DOVER : сайт. Режим доступа: <http://www.ilcdover.com> (дата обращения 25.06.2013).
271. Sramek M., Kaufman A. Alias-free voxelization of geometric objects. // IEEE Trans. Visualizat, no. 5, 1999 , pp. 251-267.
272. Stinton D. The design of the airplane: second edition. Blackwell science. - Oxford, UK, 2001, 704 p.

273. Stolte N., Kaufman A. Robust hierarchical voxel models for representation and interactive visualization of implicit surfaces in spherical coordinates // *Implicit Surfaces* '98. – 1998. – P. 81-88.
274. Stolte N., Kaufman A. Novel techniques for robust voxelization and visualization of implicit surfaces // *Graphical Models*. – 2001. – Vol. 63. – №. 6. – P. 387-412.
275. Strat T.M. Application of Data Flow Computation to the Shaded Image Problem. // Working paper 163, A. 1. Laboratory, MIT, Cambridge, Mass., May 1978.
276. The Agency for defense advanced projects USA. URL: <http://www.darpa.mil> (Data of access 07.09.2014).
277. Tozer T.C., Grace D., Thompson J. Broadband communications from a high-altitude platform: the European HeliNet program // *Electronics and communication engineering journal*, № 13, 2001, pp. 138-144.
278. Turpin T., Baktur R., Meshed patch antennas integrated on solar cells. // *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009, pp. 693-696.
279. Tuy H.K., Tuy L.T. Direct 2-D Display of 3-D Objects // *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 4, No. 10, Nov. 1984, pp. 29-33.
280. Udupa J.K. Interactive Segmentation and Boundary Surface Formation for 3D Digital Images // *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 18, 1982, pp. 213-235.
281. Vaccaro S., Gerlach L. Combination of antennas and solar cells for satellite applications // *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 29, , Apr. 2001, pp. 243-248.
282. Vaccaro S., De Maagt .P. In-flight experiment for combined planar antennas and solar cells (solvent)// *IET Microwave Antennas Propagation*, vol. 3, 2009, pp. 1279–1287.
283. Wang S., Kaufman A. Volume sampled voxelization of geometric primitives. // *Proceedings of the 4th Conference on Visualization*, October 25-29, 1993, San Jose, California, pp: 78-84.
284. Wright J., Hsieh J. A Voxel-Based Forward Projection Algorithm for Rendering Surface and Volumetric Data. // *Proc. Visualization 92*, 1992, pp. 340-348.

285. Wu X., Liu W., Wang T., Wen P. Modified polygonal mesh voxelization based on Euclidean distance measurement. // J. Computer Aided Design Computer Graphics, no. 16, 2004, pp. 592-597.
286. Wu X.J., Liu W.J., Wang T.R. Functionally graded material modeling based on 3d voxel models. // Computer Integrated Manuf. Syst., no.10, 2004, pp. 270-275.
287. Wu X., Liu W., Wang T. A new method on converting polygonal meshes to volumetric datasets. // Proceedings of the International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, October 8-13, 2003, Irbid, Jordan, pp: 116-120.
288. Yagel R., Cohen D., Kaufman A. Discrete Ray Tracing // IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 12, no. 5, Sept. 1992, pp. 19-28.
289. Yagel R., Kaufman A., Zhang Q. Realistic Volume Imaging. // Proc. Visualization 91, 1991, pp. 226-231.

Приложение 1

Общество с ограниченной ответственностью
Научно-технический центр "Элис"
Национального института авиационных технологий (НИАТ)

Новопесчаная ул., д. 8, корп. 3, Москва, 125057
Тел.: (499) 157-98-61; Тел./факс: (499) 157-53-62
ОКПО 11241652, ОГРН 1037739413150
ИНН/КПП 7712038448/774301001

Исх№ 3 от 12.07.2017г

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты диссертационной работы аспиранта кафедры 904 МАИ Куи Мин Хана в тестовом режиме внедрены в НТЦ "Элис" Национального института авиационных технологий в виде программного комплекса, позволяющего производить оценку освещенности солнечных батарей изделий **проектов «Знамя – 2», «Луна – Глоб»** при различных углах солнечного освещения с учетом как их взаимного затенения, так и экранирования другими элементами космического модуля.

Полученные результаты, основанные на использовании рецепторных геометрических моделей, позволяют не только оценивать эффективную рабочую площадь солнечных батарей, но и оптимизировать их расположение на проектируемом объекте для различных условий эксплуатации.

Генеральный директор

д.т.н. профессор



В.А.Комков

Приложение 2

**Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)**

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе

Д.А. Козорез
« 30 » августа 2017 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования аспиранта кафедры 904 МАИ Куи Мин Хана в области рецепторных методов геометрического моделирования в учебный процесс кафедры 904 в проводимых кафедрой курсах **«Инженерное геометрическое моделирование как основа подготовки специалистов в высокотехнологичных областях промышленности»** для слушателей повышения квалификации преподавателей МАИ (ФПКП МАИ) и **«Научные основы построения средств компьютерной графики, геометрического моделирования и синтеза виртуальной реальности»** (курс для аспирантов МАИ).

Заведующий кафедрой 904 МАИ
д.т.н. проф.

 М.Ю.Куприков