

На правах рукописи



Ахмедов Муслим Ринатович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ОРБИТАЛЬНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МОДУЛЕЙ  
С СОЛНЕЧНЫМИ БАТАРЕЯМИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.07.02  
«Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов»

Королев 2019

Работа выполнена в Публичном акционерном обществе «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» (РКК «Энергия»).

Научный руководитель – Синявский Виктор Васильевич,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный изобретатель Российской Федерации,  
научный консультант РКК «Энергия».

Официальные оппоненты – Геча Владимир Яковлевич,  
доктор технических наук, профессор,  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
заместитель генерального директора;

Кувшинова Екатерина Юрьевна,  
кандидат технических наук,  
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
старший научный сотрудник.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное  
военное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Военно-космическая академия  
имени А.Ф. Можайского»  
Министерства обороны Российской Федерации  
(ФГБВОУ ВПО «ВКА имени А.Ф. Можайского»  
МО РФ), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 24 сентября 2019 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте <http://mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.10,  
кандидат технических наук,  
доцент

Денискина Антонина Робертовна

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Диссертационная работа выполнена в обеспечение создания орбитальных станций (ОС) и электроракетных межорбитальных буксиров (ЭМБ), которые представляются важнейшим средством исследования и освоения космического пространства. Разработана методика проектирования модулей ОС и ЭМБ с системой электроснабжения на основе солнечных батарей большой мощности с повышенными удельными характеристиками и ресурсом.

Актуальность исследования обусловлена планами Российской Федерации по развитию пилотируемой космонавтики, представленными в «Основных положениях основ государственной политики РФ в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» № Пр-906 (утверждены Президентом Российской Федерации 19 апреля 2013 г.). Планы предусматривают развитие ОС как незаменимых платформ для космических исследований и отработки техники и технологий в условиях космоса. Намечено освоение Луны, эффективным средством обеспечения которого могут стать многоразовые ЭМБ – космические аппараты или комплексы с электроракетной маршевой тягой.

Ключевые возможности ОС и ЭМБ прямо зависят от мощности системы электроснабжения (СЭС). Из практически доступных источников электроэнергии в космосе в пределах орбит дальних планет по совокупности качеств одним из самых эффективных являются полупроводниковые солнечные батареи (СБ), демонстрирующие постепенное, но уверенное развитие. Их основной элемент – фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) – со времени появления первых образцов значительно улучшились: КПД возрос с 5 до 30 %, увеличилась стойкость к космическим условиям, производство стало массовым.

Совершенство СЭС на основе СБ достигается применением современных компонентов только в совокупности с рациональными проектными решениями. Мощные СЭС насчитывают десятки тысяч ФЭП со сложными связями, разбросом параметров и условий работы, что ограничивает каждый из них в возможности работать с предельной эффективностью. Важнейшая роль при создании крупных космических комплексов отводится расчету и математическому моделированию, которые позволяют изыскать скрытые резервы системы и снизить затраты на экспериментальную отработку. Кроме того, электрическая схема, компоновка, элементная база и алгоритм работы СЭС тесно связаны с параметрами модулей в целом и влияют даже на способ выполнения основных задач полета.

В связи с этим представляется актуальной разработка и совершенствование методики проектирования модулей ОС и ЭМБ, позволяющей учесть в комплексе факторы, влияющие на характеристики СЭС, и определить оптимальный проектный облик модулей. Необходимо развитие

методик расчета, основанных на тщательном учете физических процессов в системе электроснабжения и модуле в целом и использующих возможности современной вычислительной техники.

### **Степень разработанности темы исследования**

Характерным условием работы солнечных батарей орбитальных станций (комплексов) является вероятность частичного затенения. Выходная мощность СБ при этом значительно зависит от распределения электрического тока между элементами батарей. Известны математические модели, с разной степенью упрощения описывающие работу СБ. В настоящей работе предложены модель и методика расчета, позволяющие в полной мере учесть схему электрического соединения и вольтамперные характеристики (ВАХ) ФЭП, шунтирующих и блокирующих диодов. Модель и методика положены в основу программного обеспечения (ПО), с помощью которого выполнено проектирование научно-энергетического модуля (НЭМ) для российского сегмента МКС. Модель и ПО верифицированы с использованием телеметрии служебного модуля (СМ) РС МКС. В ходе верификации методики и ПО проведено также экспериментальное исследование влияния изменений температуры на мощность СБ с использованием транспортного грузового корабля «Прогресс МС». Предложена методика вероятностного расчета мощности СБ с учетом частичного затенения и электрических процессов, применимая на ранних этапах проектирования при недостатке исходных данных.

Задача деградации СБ электроракетного межорбитального буксира от ионизирующего излучения радиационных поясов Земли (РПЗ) находится на стыке трех проблем: моделирования РПЗ, расчета и оптимизации траектории космического аппарата (КА) с непрерывной тягой, и, собственно, расчета характеристик ФЭП и СБ после радиационного воздействия. Представления об РПЗ, в целом, сформированы, однако по-прежнему развиваются, чем обусловлено существование нескольких общепринятых моделей. Одна из них изложена в ОСТ 134-1044-2007, где также приведены готовые данные по суммарному радиационному воздействию для некоторых орбит. Расчет для прочих траекторий в указанном стандарте предлагается выполнять, разбивая околоземное пространство на ячейки с постоянной интенсивностью ионизирующего излучения РПЗ и подсчитывая время нахождения КА в каждой из них. Опубликованы работы, где расчет поглощенной дозы для электроракетного межорбитального буксира выполнен схожим образом – эшелонированием пространства по высоте. Обоим методам присуща неустранимая методическая погрешность.

В настоящей работе расчет траектории совмещен с интегрированием количества излучения. Предложены математическая модель, постановка задачи и оптимизация алгоритма, которые обеспечивают малую, контролируемую методическую погрешность при низких требованиях к вычислительным ресурсам. Разработано ПО, позволившее выполнить серии расчетов с вариацией параметров траектории буксира и толщины защитного покрытия ФЭП.

Проведен комплексный анализ деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ и выполнена оценка эффективности способов ее снижения.

Предложены эмпирические формулы для расчета снижения мощности СБ ЭМБ в РПЗ, применимые на этапе проектной разработки буксира.

### **Цели и задачи исследования**

**Целью исследования** является разработка методики проектирования и расчета модулей ОС и ЭМБ с системой электроснабжения на основе солнечных батарей большой мощности с повышенным ресурсом и удельными характеристиками, а также выработка рекомендаций по определению оптимальных проектных решений с учетом:

- затенения СБ планетой и элементами КА;
- влияния ионизирующего излучения РПЗ;
- изменения расстояния до Солнца;
- требований теплового режима;
- требований ресурса.

**Научной задачей** исследования является установление зависимости проектных параметров модулей ОС и ЭМБ с солнечными батареями большой мощности, имеющих связь с системой электроснабжения, от факторов космического пространства и требований назначения модуля, разработка и совершенствование методик расчета производительности системы, определение влияния проектных параметров модуля на удельные характеристики и ресурс системы, верификация методик путем космических экспериментов, постановка, проведение и анализ результатов космических экспериментов.

При исследовании поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. В порядке изучения существующего опыта – выполнен анализ опыта разработки и эксплуатации СЭС станций «Мир» и МКС.

2. В порядке исследования работы СБ модулей при частичном затенении:

– предложены математическая модель и методика расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов и выполнено исследование мощности СБ с учетом указанных условий;

– методика, реализованная в виде специального ПО, подтверждена экспериментально с использованием телеметрии служебного модуля (СМ) российского сегмента Международной космической станции (РС МКС);

– предложена методика вероятностного расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов в СБ, применяемая на этапе проектирования модулей при недостатке исходных данных.

3. В рамках исследования деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ:

– предложены математическая модель и методика расчета мощности СБ ЭМБ с учетом деградации от ионизирующего излучения РПЗ, разработано специальное ПО;

– выполнен анализ деградации, даны рекомендации по ее снижению;

– предложены эмпирические формулы для проектного расчета мощности СБ ЭМБ с учетом деградации от ионизирующего излучения РПЗ.

4. В рамках исследования влияния температуры на мощность СБ:

– выполнено экспериментальное исследование с использованием телеметрических данных корабля «Прогресс МС»;

– выработаны рекомендации по проектированию и расчету мощности СЭС модулей с учетом изменения температуры СБ.

5. В порядке методического обеспечения проектной разработки модулей ОС и ЭМБ:

– исследовано влияние на производительность СЭС изменения расстояния до Солнца, предложена методика его учета;

– предложены формулы для расчета среднесуточных потерь энергии в буферных аккумуляторах;

– предложен способ учета требований теплового режима;

– предложена методика проектного расчета освещенности интерьера пилотируемого КА с учетом отраженного света.

6. В плане практической реализации предложенные методики применены при проектировании научно-энергетического модуля (НЭМ) для РС МКС.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в предложении новых математических моделей и методик расчета, подтверждении корректности моделей и методик путем космических экспериментов, комплексном анализе исследуемых физических процессов, предложении эмпирических формул и выработке рекомендаций по выбору рациональных проектных решений.

Конкретно научная новизна состоит в следующем:

1. При исследовании влияния частичного затенения на работу СБ:

– предложена методика вероятностного расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов в СБ;

– выполнена верификация математической модели работы СБ при частичном затенении с использованием телеметрии служебного модуля РС МКС.

2. При исследовании деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ:

– предложена оригинальная математическая модель для расчета деградации;

– впервые выполнен комплексный анализ деградации СБ ЭМБ в РПЗ с учетом параметров траектории ЭМБ и толщины защитного покрытия ФЭП;

– впервые выполнена оценка эффективности способов снижения деградации СБ ЭМБ в РПЗ;

– впервые предложены эмпирические формулы для проектного расчета деградации СБ ЭМБ в РПЗ.

3. Предложены оригинальные методики учета требований теплового

режима при расчете допустимой нагрузки на СЭС и проектного расчета освещенности интерьера пилотируемого КА с учетом отраженного света.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

**Теоретическая значимость** работы в том, что определены характер и законы влияния на мощность СЭС модулей ОС и ЭМБ:

- затенения СБ планетой и элементами ОС (ЭМБ);
- ионизирующего излучения РПЗ.

Предложены методики расчета мощности СЭС модулей с учетом указанных факторов. Выполнена оценка эффективности способов снижения деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ. Выполнено экспериментальное подтверждение корректности методик. Выработаны рекомендации по выбору оптимальных проектных решений.

Работа имеет **практическую значимость**, так как:

1. С использованием предложенных методик в РКК «Энергия» выпущен проект научно-энергетического модуля (НЭМ) для РС МКС.
2. На основе предложенной методики разработано специальное ПО.
3. Выработаны практические рекомендации по выбору проектных параметров СЭС, а также проектных параметров модулей, ОС и ЭМБ в целом.

### **Методология и методы исследования**

Методологически исследования основаны на математическом моделировании физических процессов с последующим экспериментальным подтверждением.

### **Степень достоверности, апробация и публикация результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена непротиворечивостью исходных теоретических положений, внутренней логикой исследования, применением достоверных методов, описывающих сущность изучаемого явления и отвечающих поставленным целям и задачам работы.

Разработанные в ходе исследования расчетные методики **апробированы** в ПАО «РКК «Энергия» при проектировании научно-энергетического модуля (НЭМ) для российского сегмента МКС. Корректность методики расчета производительности СБ орбитального КА с учетом затенения планетой и элементами конструкции **подтверждена экспериментально** телеметрическими данными служебного модуля (СМ) российского сегмента МКС. Теоретические выводы о влиянии температуры на производительность СБ **подтверждены экспериментально** телеметрией космического корабля «Прогресс МС».

Основные положения и результаты работы **опубликованы** в шести статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в рекомендованный ВАК Минобрнауки РФ перечень изданий [1-6], а также **доложены** на конференциях, семинарах и научно-техническом совете:

- конференция «XLI академические чтения по космонавтике», Москва,

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24-27 января 2017 г.;

– конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники – V Козловские чтения», г. Самара, 11-15 сентября 2017 г.;

– семинары по вопросам электроракетного движения, Москва, МАИ, институт двигателестроения, кафедра 208 «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки», 17.01.2018 и 20.03.2019;

– заседание секции №2 Пилотируемые космические комплексы и системы» научно-технического совета ПАО «РКК «Энергия», 4 декабря 2018 г.

### **Личный вклад**

Личный вклад автора:

1. В исследовании влияния частичного затенения на работу СБ:
  - предложение математической модели работы СБ и методик расчета производительности;
  - участие в разработке ПО для расчета производительности СБ КА (предложение расчетных формул, разработка ТЗ, верификация);
  - верификация математической модели СБ с использованием телеметрии служебного модуля российского сегмента МКС;
  - экспериментальное исследование зависимости мощности СБ КА от температуры с использованием телеметрии корабля «Прогресс МС».
2. В исследовании деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ:
  - разработка математической модели, методики расчета и ПО;
  - комплексный анализ деградации СБ ЭМБ в РПЗ, анализ способов снижения деградации и оценка их эффективности;
  - предложение эмпирических формул для проектного расчета.
3. В методическом обеспечении проектной разработки и в разработке СЭС научно-энергетического модуля (НЭМ) для РС МКС:
  - участие в проектировании СЭС с выполнением расчетов производительности СБ;
  - предложение методики расчета потерь энергии СБ КА на круговой орбите из-за затенения планетой при произвольных углах склонения Солнца;
  - предложение методики расчета потерь энергии в буферных аккумуляторах орбитального КА с учетом неравномерности энергопотребления;
  - предложение методики учета требований теплового режима при расчете допустимой нагрузки на СЭС;
  - разработка методики и выполнение проектного расчета освещенности интерьера модуля с учетом отраженного света.

Соискатель является единоличным автором **трех** из шести опубликованных научных статей.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. По исследованию влияния частичного затенения на работу СБ:

- методика расчета производительности СБ с учетом затенения и электрических процессов в СБ;
  - верификация указанной методики с использованием телеметрии служебного модуля РС МКС;
  - методика вероятностного расчета производительности СБ с учетом затенения и электрических процессов в СБ;
  - экспериментальное исследование влияния температуры на мощность СБ с использованием телеметрии космического корабля «Прогресс МС»
2. По исследованию деградации СБ ЭМБ от ионизирующего излучения РПЗ:
- математическая модель и методика расчета мощности СБ ЭМБ с учетом деградации от ионизирующего излучения РПЗ;
  - анализ деградации и его результаты;
  - проектная методика расчета мощности СБ ЭМБ с учетом ионизирующего излучения РПЗ.
3. Результаты применения предложенных методик при разработке НЭМ для РС МКС.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа на 186 листах состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 68 наименований, списка публикаций из восьми наименований, содержит 70 рисунков и восемь таблиц.

### **Содержание работы**

**Во введении** изложено обоснование актуальности исследования, сформулированы его цели и основные задачи. Отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации. Описана структура диссертации и указаны положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** изложен анализ опыта разработки и эксплуатации систем электроснабжения модулей орбитального комплекса «Мир», российского и американского сегментов МКС, также, в небольшой степени, станций «Салют». Поставлена задача исследования.

Модули ОК «Мир», российского и американского сегментов МКС и, в частности, их системы электроснабжения, созданы с учетом богатого предшествующего опыта и воплощают много эффективных идей и решений. Несмотря на время, прошедшее с момента создания, они по-прежнему могут быть прототипами перспективных изделий. При анализе рассмотрены состав, структура, выбор компонентов и принцип работы систем. Отмечены особенности, преимущества и недостатки, обозначены возможные пути улучшения характеристик СЭС.

При исследовании поставлены следующие основные задачи:

1. Методически обеспечить проектную разработку научно-энергетического модуля РС МКС:

- исследовать характер затенения СБ планетами и элементами космического аппарата (КА), выяснить происходящее при этом снижение производительности СБ и разработать методику учета;

- верифицировать методику с использованием данных о существующих изделиях;

- предложить методики учета требований теплового режима, требований назначенного ресурса, потерь энергии в буферных аккумуляторах и изменения расстояния до Солнца, требований освещенности интерьера;

- предложить рекомендации по выбору проектных решений СЭС ОС.

2. Обеспечить методически разработку СЭС ЭМБ в плане учета деградации СБ под действием ионизирующего излучения РПЗ:

- предложить методику расчета мощности СБ ЭМБ с учетом ионизирующего излучения РПЗ;

- установить характер и закономерности влияния ионизирующего излучения РПЗ на мощность СБ ЭМБ;

- предложить способы защиты от деградации и оценить их эффективность.

**Во второй главе** изложены методика учета затенения СБ модулей орбитальной станции планетами и конструктивными элементами, методики учета изменения расстояния до Солнца, потерь энергии в буферных аккумуляторах, требований теплового режима, требований освещенности интерьера, анализ влияния температуры на мощность СБ, методика расчета и анализ деградации СБ многоцветного ЭМБ в радиационных поясах Земли.

**В разделе 2.1** представлена методика учета затенения СБ планетой и элементами КА. Вводится понятие коэффициента освещенности (коэффициента затенения) как отношения моментальной мощности СБ  $W_{СБ}(t)$  к максимальной  $W_{СБ}^0$  (рисунок 1):

$$k_{осв}(t) = W_{СБ}(t) / W_{СБ}^0.$$

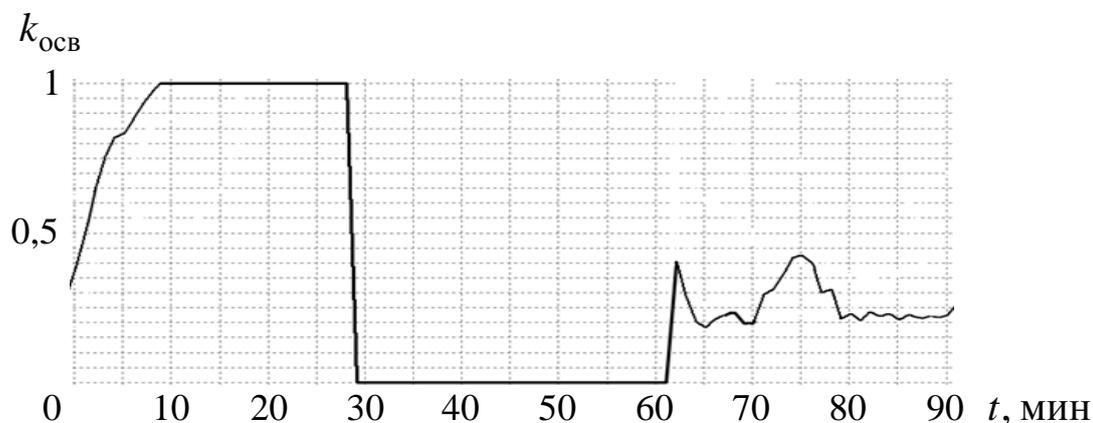


Рисунок 1 – Пример графика изменения коэффициента освещенности СБ КА в течение орбитального витка

При разработке и эксплуатации орбитального КА практический интерес

представляет средневитковая мощность СБ

$$\bar{W}_{\text{СБ}} = (1/T) \int_0^T W_{\text{СБ}}(t) dt,$$

где  $T$  – период орбиты.

Используется также средневитковый коэффициент освещенности

$$\bar{k}_{\text{осв}} = (1/T) \int_0^T k_{\text{осв}}(t) dt,$$

раскладываемый на множители:

$$\bar{k}_{\text{осв}} = \bar{k}_{\text{пл}} \bar{k}_a,$$

первый из которых обусловлен затенением планеты, а второй – затенением конструктивными элементами КА.

Если солнечные батареи в течение всего освещенного участка орбиты полностью освещены и ориентированы нормалью на Солнце, то  $\bar{k}_a = 1$  и коэффициент освещенности равен относительной продолжительности освещенного участка орбиты  $\tau$ :

$$\bar{k}_{\text{осв}} = \bar{k}_{\text{пл}} = \tau = T_{\text{осв}}/T,$$

где  $T$  – период витка,  $T_{\text{осв}}$  – время нахождения КА на его освещенной части.

Относительная продолжительность освещенного участка круговой орбиты зависит от угла склонения Солнца  $\beta$ , примерно как показано на рисунке 2. В работе также приведены формула зависимости и ее вывод.

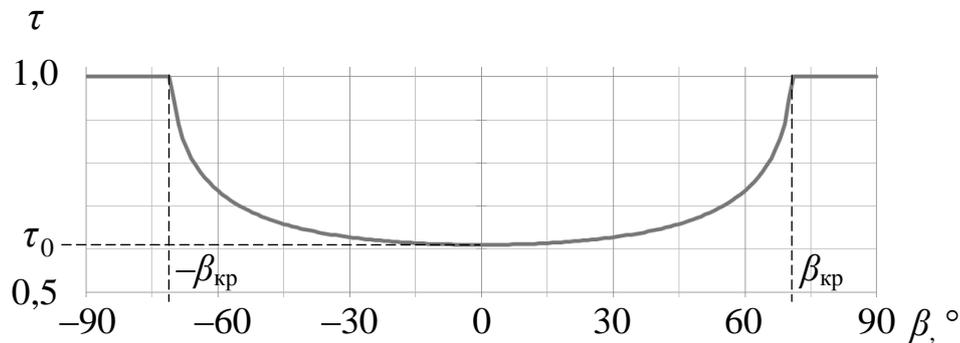


Рисунок 2 – Пример графика относительной продолжительности освещенного участка круговой орбиты в зависимости от угла склонения Солнца

Угол склонения Солнца  $\beta$  зависит от времени, зависимость задается параметрами орбиты КА. Средний коэффициент затенения СБ планетой за период  $T$ , например, за месяц или за год, можно вычислить интегрированием:

$$\bar{k}_{\text{пл.Т}} = (1/T) \int_0^T k_{\text{пл}}(\beta(t)) dt.$$

Вычисление средневиткового коэффициента затенения СБ элементами КА ( $\bar{k}_a$ ) – задача, не решаемая аналитически. Расчет упрощается, если аппарат ориентирован по осям орбитальной системы координат. Тогда светотеневая картина на его СБ при равных углах склонения Солнца повторяется, и это делает возможным каждому углу  $\beta$  сопоставить свой график  $k_{\text{осв}}(t)$ , найти средневитковые значения  $\bar{k}_{\text{осв}}(\beta)$  и построить сводный график (рисунок 3).

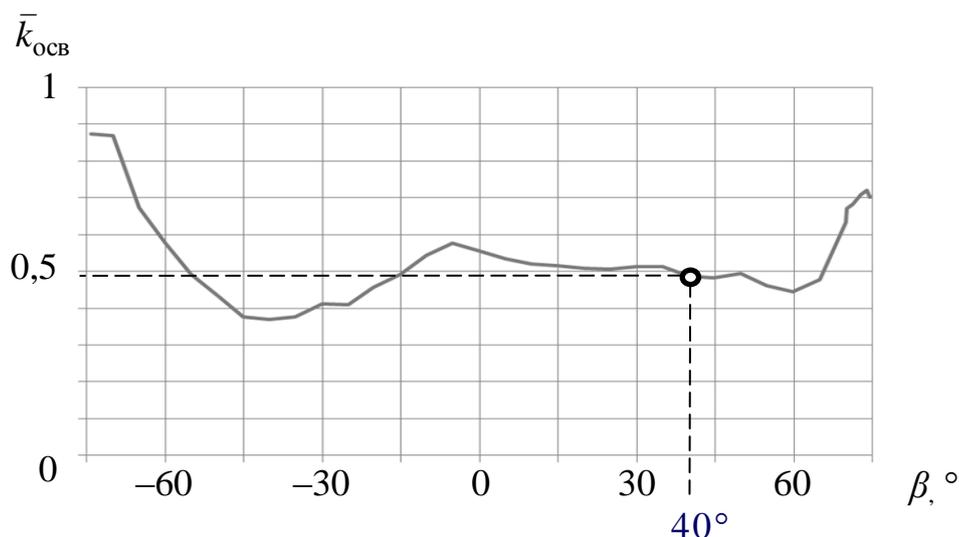


Рисунок 3 – Средневитковый коэффициент освещенности СБ НЭМ в зависимости от угла склонения Солнца

В наиболее сложном виде задача возникла при проектировании научно-энергетического модуля (НЭМ) для российского сегмента МКС. При расчете СЭС НЭМ мгновенный коэффициент освещенности  $k_{\text{осв}}(t)$  первоначально определялся геометрически подсчетом площади освещенной части СБ, исходя из предположения, что мощность батарей пропорциональна количеству собираемого света. В действительности при частичном затенении батарей многие освещенные ФЭП тоже не работают: последовательная цепочка не дает тока в общую цепь, если из-за затенения нескольких ФЭП напряжение на ее концах становится ниже напряжения на шине питания (рисунок 4).

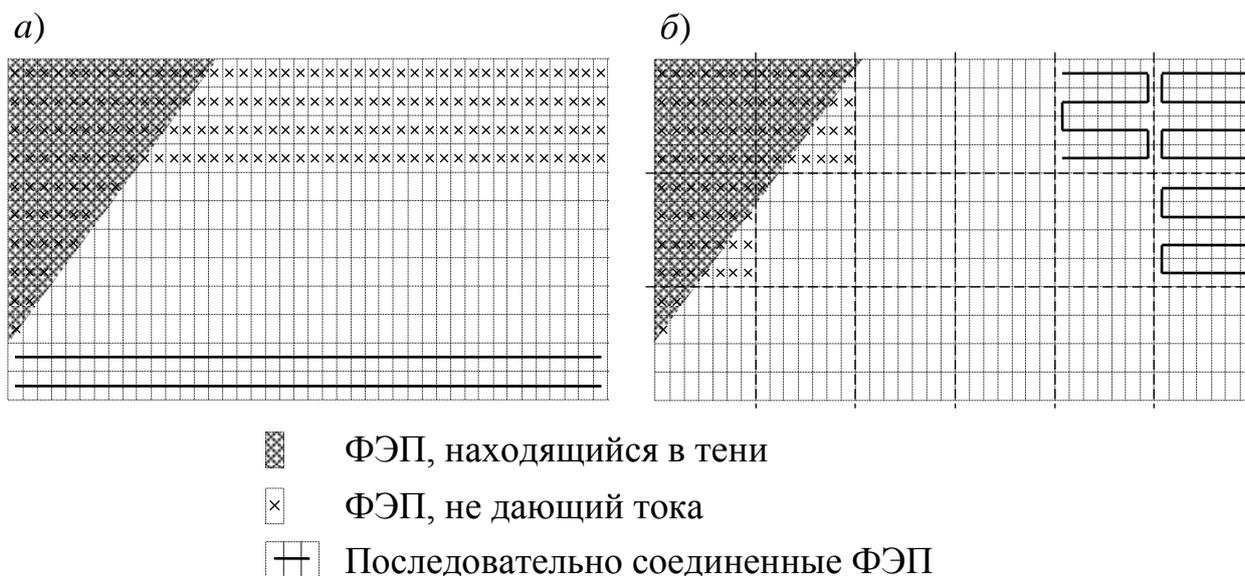


Рисунок 4 – Работа панелей СБ с линейным (а) и компактным (б) расположением последовательных цепочек ФЭП при частичном затенении

В настоящей работе предложена математическая модель СБ, учитывающая расположение ФЭП, их вольтамперные характеристики (ВАХ), схему электрического соединения, а также ВАХ блокирующих и шунтирующих

диодов. Уравнение баланса напряжений в последовательной цепочке ФЭП:

$$n_0 U(I, 0) + n_1 U(I, \varepsilon) - U_d(I) = U_{\text{пит}},$$

где  $n_0$  и  $n_1$  – количество затененных и освещенных ФЭП в цепочке;  $U(I, 0)$  – ВАХ ФЭП в темноте;  $U(I, \varepsilon)$  – ВАХ ФЭП при относительной освещенности  $\varepsilon$ ;  $U_d(I)$  – ВАХ блокирующего диода;  $U_{\text{ст}}$  – напряжение стабилизации.

Уравнения ВАХ ФЭП с шунтирующим диодом:

$$I = \varepsilon I_{\text{ф.0}} - I_{\text{о.н}} \left[ \exp \frac{q(U + IR_{\text{п}})}{AkT} - 1 \right] - \frac{U + IR_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}}, \quad U \geq 0,$$

$$I = I_{\text{к.з}}(\varepsilon) + I_{\text{о.н.ш}} \left[ \exp \left( -\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right], \quad U < 0,$$

где  $I_{\text{ф.0}}$  – фототок при полном отвесном освещении,  $I_{\text{о.н}}$  – обратный ток насыщения,  $q$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура ФЭП,  $A$  – коэффициент неидеальности (диодный коэффициент),  $R_{\text{п}}$  – сопротивление последовательное,  $R_{\text{ш}}$  – сопротивление шунтирующее;  $I_{\text{к.з}}(\varepsilon)$  – ток короткого замыкания при освещенности  $\varepsilon$ , который находится из первого уравнения при  $U = 0$ ;  $I_{\text{о.н.ш}}$  – обратный ток насыщения шунтирующего диода.

Предложен также вариант уравнений для СБ без шунтирующих диодов.

Уравнения ВАХ блокирующего диода (лавинного пробоя и при пробое):

$$I = I_{\text{о.н.д}} \left[ \exp \frac{qU_{\text{д}}}{kT} - 1 \right], \quad U_{\text{д}} \geq -U_{\text{пр.д}},$$

$$I = -I_{\text{пр.д}} - I_2 \ln \frac{U_{\text{д}} + U_{\text{пр.д}}}{U_2}, \quad U_{\text{д}} < -U_{\text{пр.д}},$$

Модель позволяет построить серию ВАХ последовательной цепочки ФЭП, например, как на рисунке 5, а также зависимость силы тока цепочки от количества затененных ФЭП (рисунок 6).

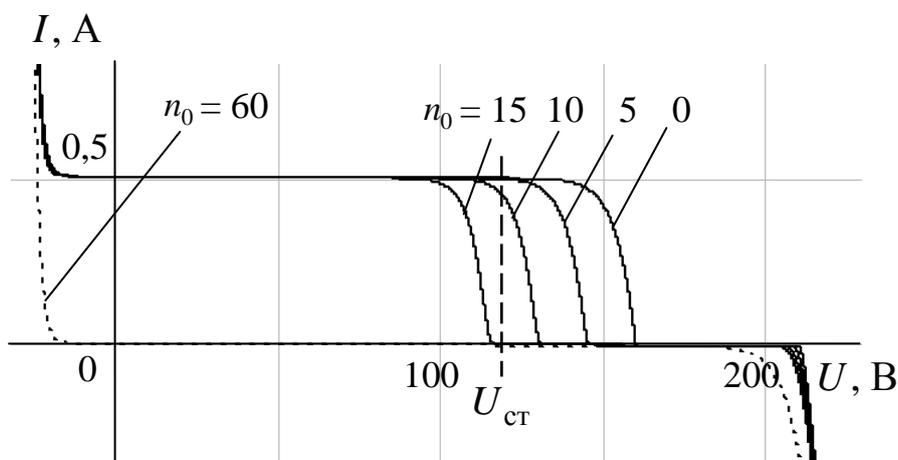


Рисунок 5 – Вольтамперные характеристики цепочки из 60 ФЭП при различном количестве затененных элементов  $n_0$

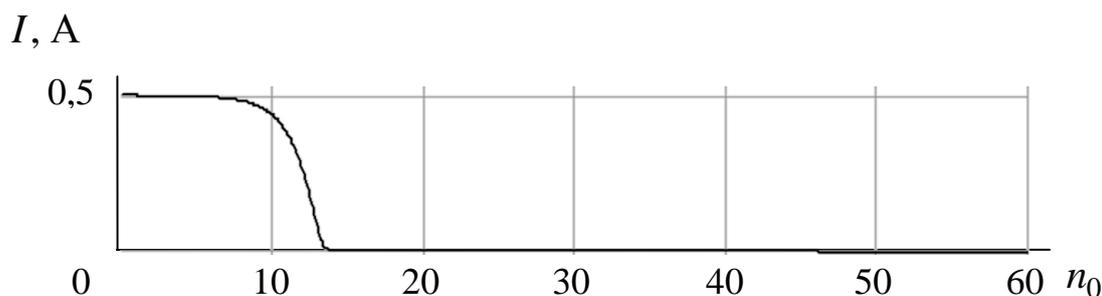


Рисунок 6 – Сила тока цепочки в зависимости от количества затененных ФЭП

Последовательные цепочки ФЭП, как правило, подключаются к шине питания параллельно, поэтому ток СБ вычисляется суммированием токов цепочек. Мощность СБ находится умножением тока СБ на напряжение шины питания (напряжение стабилизации).

В работе представлено краткое описание специального ПО для расчета производительности СБ КА, разработанного факультетом вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова на основе описанной методики. ПО успешно применено при проектировании научно-энергетического модуля для РС МКС и пилотируемого транспортного корабля нового поколения (ПТК НП).

**В разделе 2.2** изложена методика вероятностного расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов. Методика применима на этапах проектирования КА, когда конструкция СБ точно не определена. Численное моделирование работы панелей СБ в разных случаях затенения позволило обнаружить и описать корреляцию между площадью освещенной части  $S$  и мощностью  $P$  (рисунок 7).

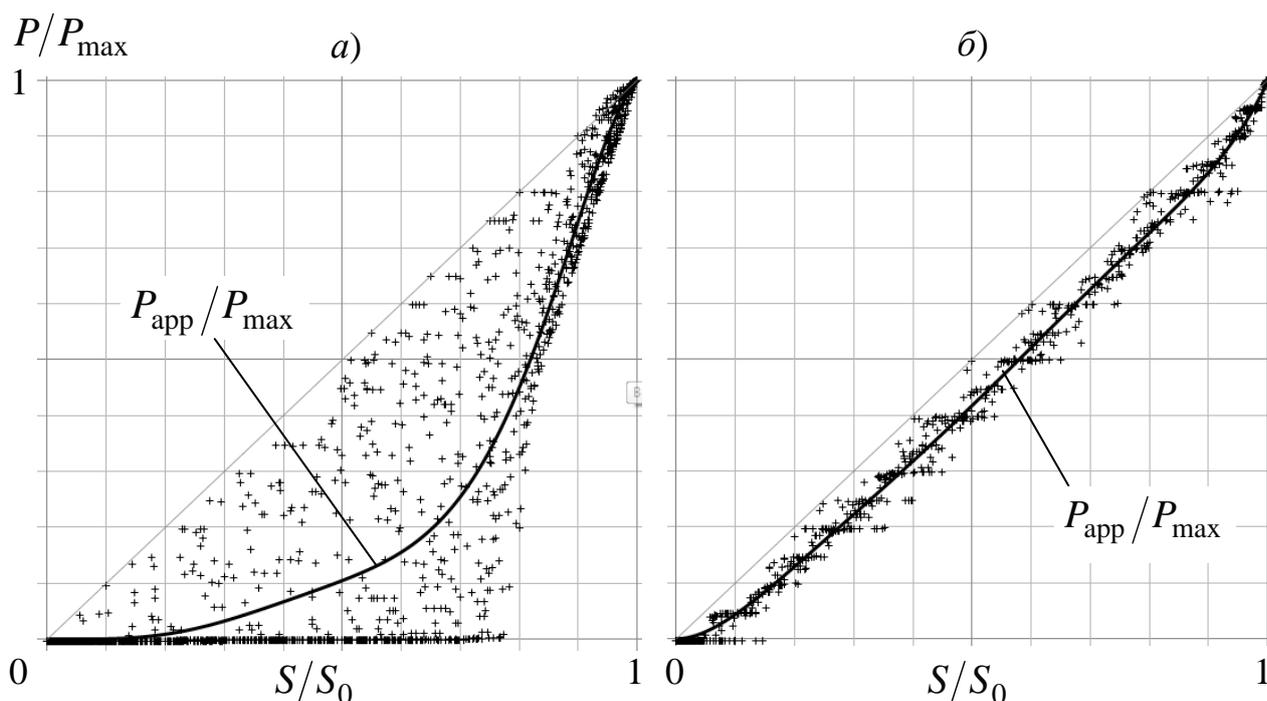


Рисунок 7 – Результаты математического моделирования панелей СБ при частичном затенении. Цепочки ФЭП расположены в линию (а) и компактно (б)

Множество расчетных значений аппроксимируется функцией  $P_{\text{app}}(S)$ , значения которой, практически, можно считать наиболее вероятной мощностью панели при известной площади освещенной части, то есть  $P_{\text{app}}(S) = \langle P \rangle(S)$ . Основная идея методики в том, что моментальная мощность СБ представляется случайной величиной, флуктуирующей около наиболее вероятного значения, которое зависит только от площади ее освещенной части:

$$P = \langle P \rangle(S) \pm \Delta P.$$

Методика представляет интерес при вычислении средней мощности за интервал времени  $T$ , при этом расчет тем точнее, чем больше интервал:

$$\langle \bar{P} \rangle = (1/T) \int_0^T \langle P \rangle(S(t)) dt.$$

Исследование показывает, что расположение последовательных цепочек ФЭП в линию, как это требуется при большом выходном напряжении СБ, оборачивается существенными потерями мощности при частичном затенении батарей (см. рисунок 7). Снизить потери можно многократным увеличением количества ФЭП в составе СБ. Это объясняется тем, что, зависимость  $\langle P \rangle(S)$ , полученная для панели, не применима к СБ в целом (рисунок 8).

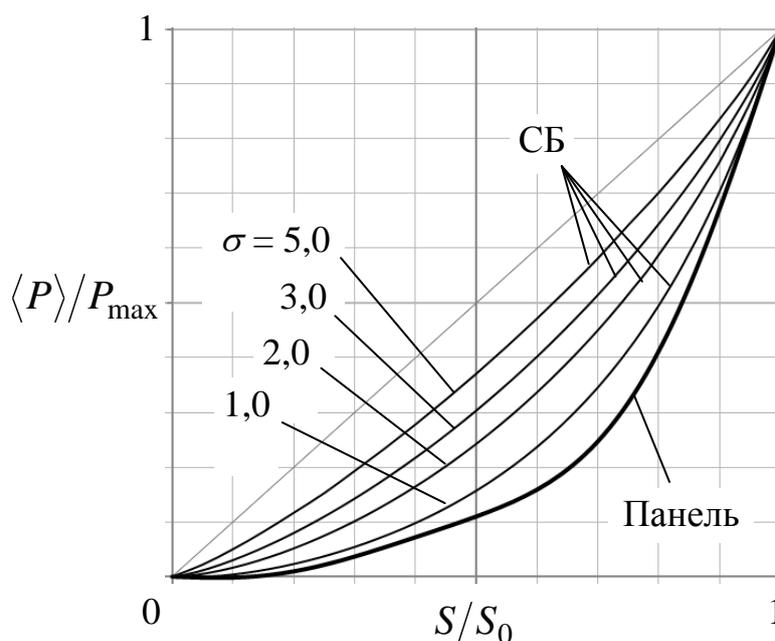


Рисунок 8 – Наиболее вероятная мощность одной панели и СБ в целом при частичном затенении

В работе показано, что для расчета коэффициента освещенности СБ не обязательно моделировать всю батарею. Предложен способ экстраполяции результатов расчета одной типовой панели на батарею в целом. Для этого использован закон распределения, названный парным логарифмически нормальным, плотность вероятности которого выражается формулой

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma} s(1-s)} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{s}{\mu} - \ln \frac{1-s}{1-\mu} \right)^2 \right].$$

Распределение задано на интервале от 0 до 1, его плотность может иметь один или два максимума. Парный логарифмически нормальный закон может быть использован для описания вероятной площади тени на любой панели СБ при известной площади тени на батарее в целом.

**В разделе 2.3** представлено исследование влияния изменения расстояния от Солнца на мощность СБ и предложены способы его учета.

**В разделе 2.4** предложен способ учета потери энергии в буферных аккумуляторах орбитального модуля при неравномерном энергопотреблении.

**В разделе 2.5** приведен анализ влияния температуры на мощность СБ.

**В разделе 2.6** предложена методика учета влияния ионизирующего излучения радиационных поясов Земли (РПЗ) на работу многоцветного солнечного электроракетного межорбитального буксира (ЭМБ).

Рассмотрены составляющие задачи: 1) расчет траектории КА с непрерывной тягой; 2) вычисление количества излучения, поглощенного ФЭП; 3) расчет мощности СБ с учетом поглощенного излучения. Предложены комплексная постановка задачи и оптимизация алгоритма, обеспечивающие малую методическую погрешность и низкие требования к вычислительным ресурсам.

Траектория ЭМБ рассчитывается как плоская с последующей привязкой к пространственной системе координат. Плоское движение вычисляется в полярной системе координат  $r, \vartheta$  численным решением начальной задачи для системы уравнений с полярным углом  $\vartheta$  в качестве независимой переменной:

$$\begin{aligned} r' &= u, \\ u' &= r + \frac{2u^2}{r} + \frac{1}{\omega^2} \left( \frac{a \sin \delta}{\cos \Theta} - \frac{\mu}{r^2} \right), \\ \omega' &= \frac{a \cos(\Theta + \delta)}{\omega r} - \frac{2\omega u}{r}, \end{aligned}$$

где штрих означает дифференцирование по  $\vartheta$ ;  $\omega = d\vartheta/dt$  – угловая скорость КА относительно центра тяготения;  $\Theta = \arctg(u/r)$  – угол наклона траектории к местному горизонту,  $a$  – ускорение силы тяги;  $\delta$  – угол отклонения вектора тяги от вектора скорости.

С помощью формул преобразования координат определяется текущее положение ЭМБ в геомагнитных координатах  $L, B$ , в которых описана и модель РПЗ. Интегрирование интенсивности заряженных частиц РПЗ по траектории буксира позволяет выяснить процесс их накопления (рисунок 9).

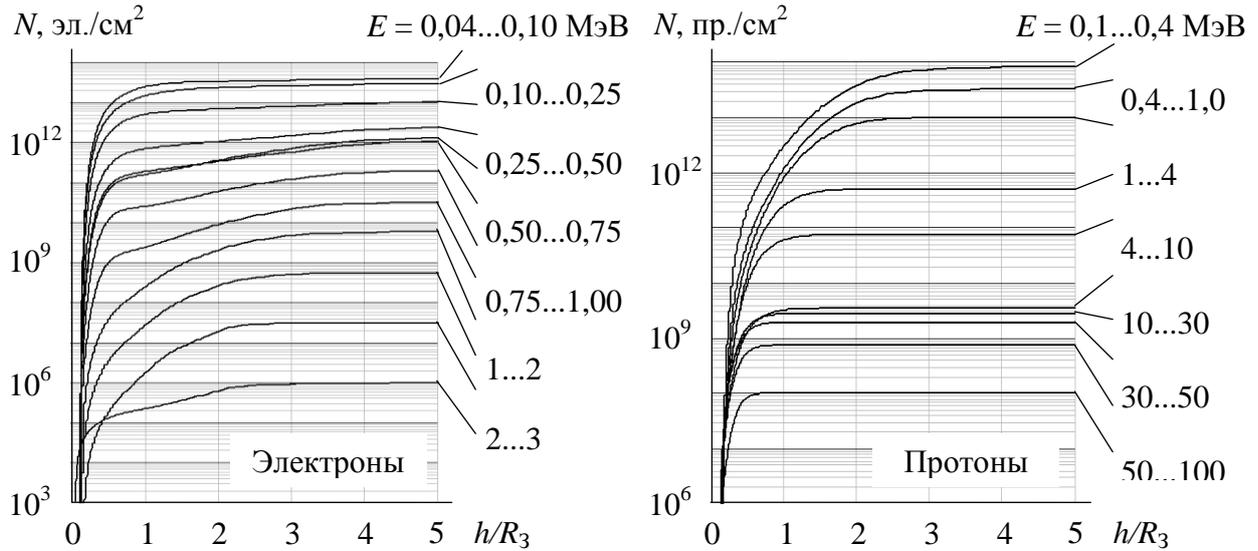


Рисунок 9 – Суммарный поток частиц, накапливаемый буксиром по мере прохождения РПЗ

Интегрирование интенсивности потока частиц по всему энергетическому спектру с учетом восприимчивости ФЭП позволяет определить снижение мощности СБ по мере удаления ЭМБ от Земли (рисунок 10), а также с количеством буксировок.

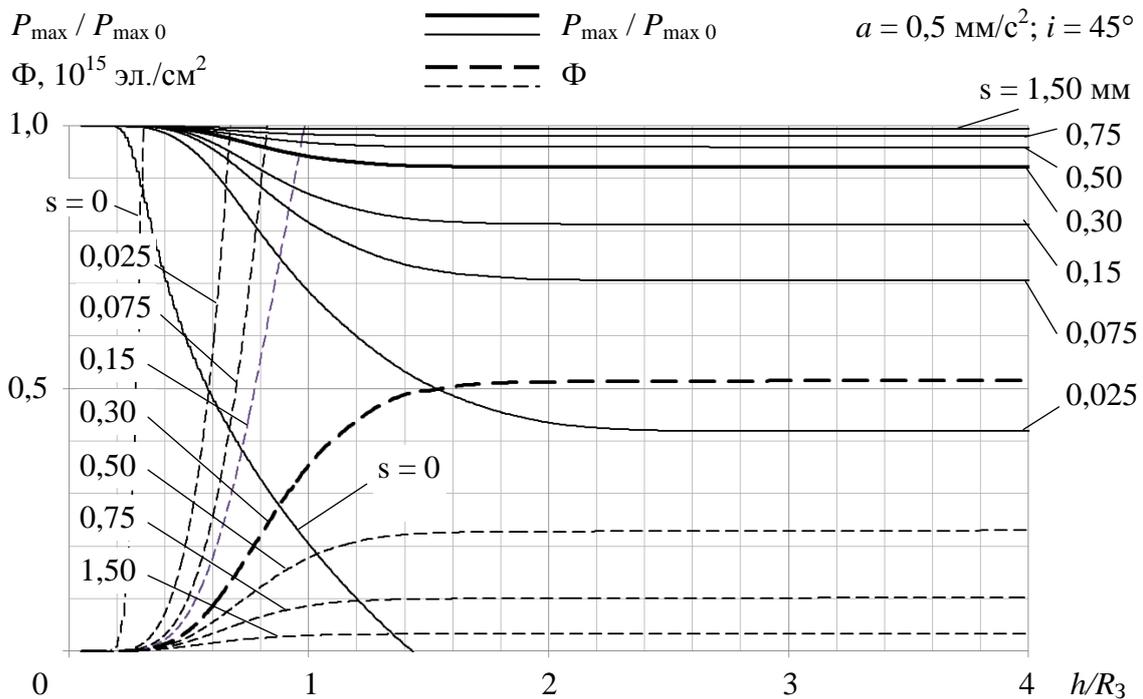


Рисунок 10 – Изменение флюенса ( $\Phi$ ) и максимальной мощности ( $P_{\max}$ ) ФЭП на основе GaAs с удалением межорбитального буксира от Земли при различной толщине защитного стекла  $s$  ( $h$  – расстояние от буксира до поверхности Земли)

Разработано ПО, с помощью которого выполнены серии расчетов

снижения мощности СБ ЭМБ при прохождении РПЗ с вариацией тягового ускорения, наклона траектории и толщины защитного покрытия ФЭП. Проведен комплексный анализ деградации СБ. Предложены эмпирические формулы и основанная на них проектная методика расчета:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot 10^{-k(i)} / a,$$

$$k(i) = c_1(1 - \cos 2i) + c_2(1 - \cos 4i) + c_3(1 - \cos 6i),$$

где  $\Phi$  – флюенс, накопленный в результате прохождения РПЗ;  $\Phi_0$  – флюенс, накопленный за одно прохождение РПЗ при тяговом ускорении  $1 \text{ мм/с}^2$  и наклоне  $0^\circ$ ;  $a$  – тяговое ускорение буксира,  $\text{мм/с}^2$ ;  $k(i)$  – показатель, учитывающий наклон траектории ЭМБ к экватору Земли;  $c_1, c_2, c_3$  – константы, зависящие от вида ФЭП и толщины защитного покрытия.

Сделан вывод, что применение СБ на многоцветных околоземных ЭМБ требует специальных мер для снижения деградации от воздействия ионизирующего излучения РПЗ. Эффективным представляется защитное покрытие ФЭП, несмотря на заметную массу. Масса покрытия может быть снижена, если допустить определенное уменьшение производительности СБ в течение эксплуатации. Проекты ЭМБ с гибкими СБ требуют создания долговечных гибких антирадиационных оптически прозрачных покрытий. Снизить деградацию СБ можно, в том числе, повышая тяговое ускорение ЭМБ и увеличивая наклон плоскости движения буксира к земному экватору. Все описанные меры рекомендуется рассматривать при комплексной оптимизации параметров и состава ЭМБ.

**В третьей главе** описано применение методик при проектировании СЭС научно-энергетического модуля для РС МКС.

В ходе проектной разработки НЭМ рассчитана производительность системы электроснабжения, оптимизированы ее параметры и состав. Принципиальной особенностью расчета является совместный учет периодического затенения СБ конструктивными элементами станции, КПД аккумуляторных батарей, КПД аппаратуры регулирования и контроля, а также требований обеспечения теплового режима.

Выбран состав СЭС, обеспечивающий наименьшие суммарные затраты на создание и эксплуатацию. Выполнен анализ вариантов на эффективность и техническую реализуемость. Показано, что технически возможно создание СЭС НЭМ, используя СБ с ФЭП на основе арсенида галлия. На основании выполненного расчета сделан вывод о предпочтительности в случае НЭМ никель-водородных аккумуляторных батарей, как обеспечивающих более высокую технико-экономическую эффективность. Предложена и применена методика учета требований теплового режима при расчете допустимой нагрузки. Предложена методика проектного расчета освещенности интерьера пилотируемых КА и показано ее применение при разработке НЭМ.

**В четвертой главе** представлено экспериментальное исследование корректности методики расчета производительности СБ модулей.

**В разделе 4.1** приведен сравнительный анализ расчетной и

экспериментальной производительности СБ служебного модуля (СМ) РС МКС.

На основе телеметрической (ТМ) информации построены зависимости тока СБ СМ от времени при заданных углах склонения Солнца  $\beta$ . Математической фильтрацией показания ТМ датчиков освобождены от высокочастотных флуктуаций. Выполнена их тарировка. Проблема отрывочности информации решена наложением фрагментов ТМ информации, записанной на витках с близким значением угла  $\beta$ , благодаря чему построены полные графики тока СБ, а также оценена случайная составляющая, возникающая из-за подсветки СБ отраженным светом Земли (рисунок 11). Резервирование датчиков использовано для оценки погрешности измерений.



Рисунок 11 – Полный и фрагментарные графики тока СБ СМ при  $\beta = 0^\circ$

Расчетные графики тока СБ СМ получены с помощью специального ПО для расчета производительности СБ КА, разработанного факультетом ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова на основе предложенной в данной работе методики. Проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных величин тока СБ и интеграла тока (пример на рисунке 12).

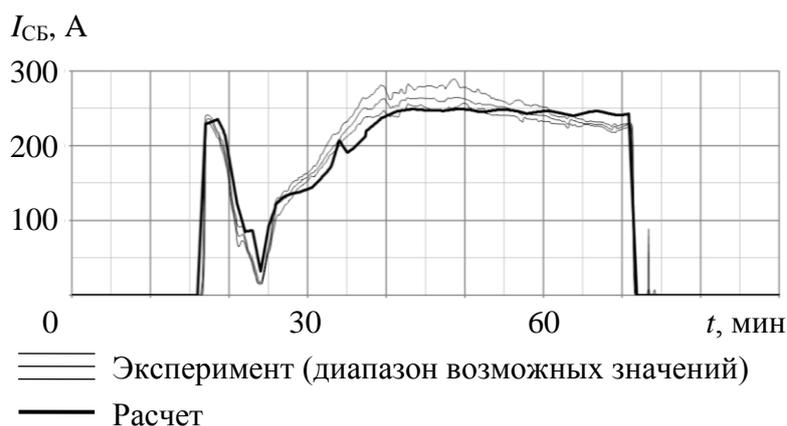


Рисунок 12 – Моментальный ток СБ СМ ( $\beta_{расч} = 0^\circ$ )

Анализ позволяет сделать следующие выводы: случайные по времени расхождения силы тока СБ СМ обусловлены неизбежным упрощением геометрической модели МКС и в данном случае не превышают  $\pm 10\%$ ; прибавка среднесуточной мощности СБ СМ из-за подсветки может достигать  $10\%$  в зависимости от угла склонения Солнца; при больших углах склонения

Солнца погрешность, составляющая от 0 до 10 %, обусловлена непредсказуемостью ориентации СБ и радиаторов американского сегмента МКС.

Предлагаемая методика расчета мощности СБ не учитывает изменений температуры ФЭП, полагая ее постоянной. Для обоснования принятого подхода выполнены анализ влияния температуры на параметры СБ путем исследования ВАХ ФЭП, а также экспериментальное исследование с использованием грузового космического корабля «Прогресс МС» (рисунки 13, 14).

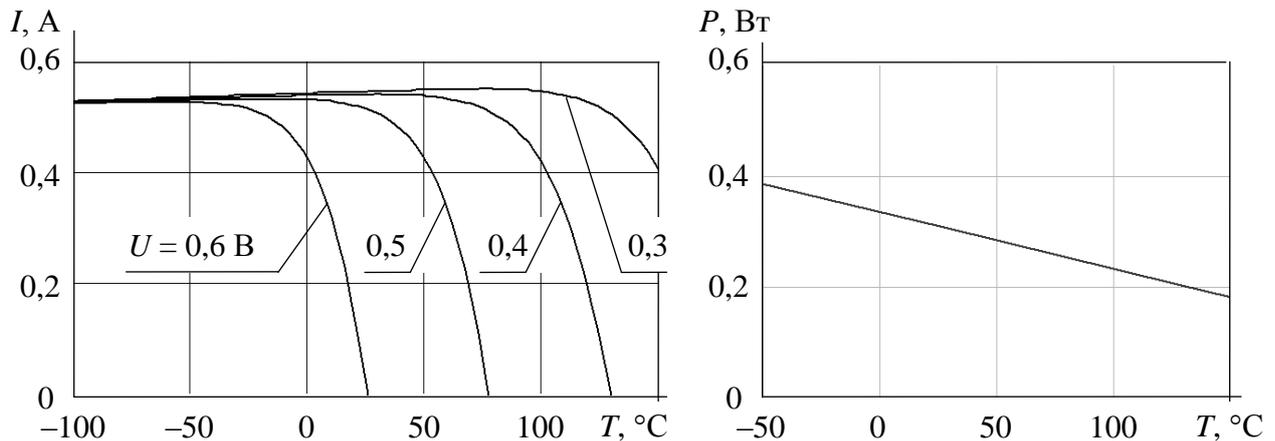


Рисунок 13 – Зависимости тока (мощности) ФЭП от температуры при стабилизированном напряжении (а) и в режиме максимальной мощности (б)

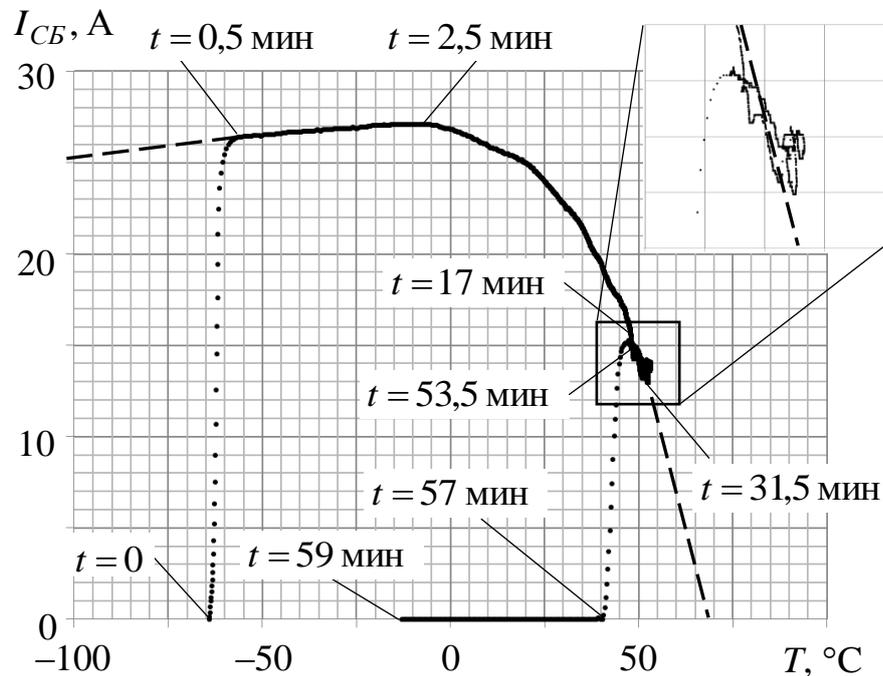


Рисунок 14 – Взаимное изменение температуры и тока СБ корабля «Прогресс МС-07».  $t = 0$  соответствует моменту выхода корабля из тени Земли. Штриховые линии показывают экстраполированные значения

Характер влияния температуры на ток и мощность СБ зависит от способа согласования СБ с потребителями тока, из которых рассмотрены, как наиболее распространенные, стабилизация напряжения питания и экстремальное

регулирование.

В модулях российского и американского сегментов МКС напряжение на шинах питания СЭС поддерживают регуляторы тока, что целесообразно, когда состав потребителей заранее неизвестен. Подход, впервые примененный и отлично зарекомендовавший себя на ОС «Мир», снижает требования к потребителям тока и обеспечивает возможность наращивания СЭС без согласующих устройств. Экстремальный регулятор позволяет эксплуатировать СБ непрерывно в режиме максимальной энергоотдачи и необходим, например, в спутниках-ретрансляторах для обеспечения наилучшего радиоприема или в КА с электроракетной маршевой тягой.

При стабилизированном напряжении ток СБ зависит от температуры незначительно, если температура находится в предусмотренном интервале, а ресурс не выработан. В таком случае предлагаемая методика расчета мощности СЭС при частичном затенении СБ применима. Для обеспечения стабильного тока СБ во всем допустимом интервале температур рекомендуется на этапе проектирования модуля выбирать достаточно низкое рабочее напряжение ФЭП, исходя из зависимости его электрических параметров от температуры.

## **Заключение**

Разработана методика проектирования модулей орбитальных станций (комплексов) и многоразовых электроракетных межорбитальных буксиров с системой электроснабжения на основе солнечных батарей большой мощности с повышенными удельными характеристиками и ресурсом. Определены зависимости проектных параметров модулей и системы от условий эксплуатации и требований назначения. Предложены, верифицированы и применены на практике методики расчета производительности системы. Выработаны рекомендации по выбору оптимальных проектных решений.

Предложена математическая модель и методика расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов. Модель и методика положены в основу специального ПО для расчета производительности СБ КА. Корректность методики и ПО подтверждена экспериментально с использованием телеметрии служебного модуля РС МКС. На базе корабля «Прогресс МС» выполнено экспериментальное исследование влияния температуры на электрическую мощность СБ. Определены условия применимости методик расчета без учета изменений температуры и выработаны рекомендации по проектированию СЭС модулей с учетом нагрева СБ. Методика и ПО использованы при разработке научно-энергетического модуля для РС МКС. Предложена вероятностная методика расчета мощности СБ при частичном затенении с учетом электрических процессов.

Предложены математическая модель, методика расчета, алгоритм и ПО для расчета деградации СБ ЭМБ в радиационных поясах Земли. Согласно результатам анализа применение СБ в качестве источника энергии на многоразовых околоземных ЭМБ требует специальных мер для снижения деградации, вызываемой ионизирующим излучением РПЗ. Эффективной мерой

представляется защитное покрытие ФЭП, однако его масса должна быть значительна. Снизить деградацию СБ также можно, повышая тяговое ускорение ЭМБ и увеличивая наклонение плоскости движения буксира к земному экватору. Все указанные меры следует рассматривать при комплексной оптимизации параметров и состава буксира. Предложены эмпирические формулы для расчета деградации СБ, применимые при проектировании ЭМБ.

В ходе проектной разработки научно-энергетического модуля для РС МКС определены параметры и состав системы энергоснабжения, выполнен анализ вариантов на эффективность и техническую реализуемость. С учетом проектных ограничений разработана СЭС на основе ФЭП из арсенида галлия. Сделан выбор аккумуляторных батарей, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на создание и эксплуатацию системы. Автором выполнен расчет производительности СЭС НЭМ, предложены методики учета КПД аккумуляторных батарей, КПД аппаратуры регулирования и контроля, требований теплового режима, предложена методика и выполнен проектный расчет освещенности интерьера НЭМ.

### **Публикации**

1. Ахмедов М.Р., Бидеев А.Г., Макарова Е.Ю., Сазонов В.В., Хамиц И.И. Сравнительный анализ расчетной и экспериментальной производительности солнечных батарей орбитального космического аппарата на примере служебного модуля российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2018. № 3. С. 89-101.

2. Ахмедов М.Р. Методика вероятностного расчета мощности солнечных батарей космического аппарата при частичном освещении // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 5. С. 109-123.

3. Ахмедов М.Р. Анализ деградации фотоэлектрических преобразователей солнечного электроракетного межорбитального буксира от ионизирующего излучения радиационных поясов Земли // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 2. С. 109-123.

4. Ахмедов М.Р. Методика проектного расчета освещенности интерьера модулей пилотируемых космических комплексов // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 120-131.

5. Бидеев А.Г., Семин А.Ю., Кузнецов А.В., Ахмедов М.Р. Проектирование системы электроснабжения научно-энергетического модуля для российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2015. № 2. С. 64-74.

6. Ахмедов М.Р., Бидеев А.Г., Сазонов В.В., Хамиц И.И. Экспериментальное исследование влияния температуры на производительность солнечных батарей с использованием телеметрии космического корабля «Прогресс МС» // Космическая техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 62–69.

7. Ахмедов М.Р. Расчет деградации фотоэлектрических преобразователей

солнечного электроракетного межорбитального буксира от ионизирующего излучения радиационных поясов Земли // XLI академические чтения по космонавтике 24-27 января 2017 г. Сборник тезисов. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 72-73.

8. Ахмедов М.Р. Оптимизация проектных параметров систем электроснабжения орбитальных станций на примере СЭС НЭМ // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники. V Козловские чтения», г. Самара, 2017. Том 1. С. 544-545.

### **Принятые сокращения**

КА	– космический аппарат;
МКС	– Международная космическая станция;
МЛМ	– многоцелевой лабораторный модуль;
НЭМ	– научно-энергетический модуль;
ОС	– орбитальная станция;
ОК	– орбитальный комплекс;
РС МКС	– российский сегмент Международной космической станции;
СБ	– солнечная батарея;
СМ	– служебный модуль;
СЭП	– система электропитания;
СЭС	– система электроснабжения;
ФГБ	– функционально-грузовой блок;
ФЭП	– фотоэлектрический преобразователь;
ЭМБ	– электроракетный межорбитальный буксир.