

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. Зав. кафедрой

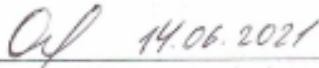
В.В. Соловьёв

« 15 » июня 2021г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка корпуса и моделирование трёхмерных неоднородных тепловых полей полезной нагрузки «Фотон-Амур 2.0

Исполнитель
студент группы 717-об


(подпись, дата)

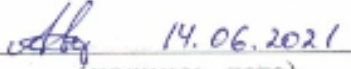
Огородников А.А.

Руководитель
доцент, канд. физ.- мат
наук


(подпись, дата)

Фомин Д.В.

Консультант
канд. физ.- мат. наук


(подпись, дата)

Аверьянов В.Н.

Нормоконтроль
ассистент кафедры СИТРК


(подпись, дата)

Арзков М.А.

Благовещенск 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. Зав. кафедрой

В.В. Соловьёв

« 26 » апреля 2021 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Огородникова Александра Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка корпуса и моделирование трёхмерных неоднородных тепловых полей полезной нагрузки «Фотон-Амур 2.0

(утверждена приказом от 05.04.2021 № 658-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15 июня 2021 года

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: спецификация на ПН «Фотон-Амур 2.0»; данные ЕСКД.


4. Содержание выпускной квалификационной работы: общая часть, проектирование корпуса, расчет методом тепловых балансов, технологическая карта, экономическая часть, техника безопасности.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, объект исследования, первый вариант корпуса, второй вариант корпуса, третий вариант корпуса, элементарные объемы, оценка корректности ПО, результаты моделирования, заключение.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: канд. физ.- мат. наук Аверьянов В.Н.

7. Дата выдачи задания: 26.04.2021.

Руководитель выпускной квалификационной работы: доцент, канд. физ.- мат.
наук Фомин Д.В.

Задание принял к исполнению (дата): 26.04.2021  _____

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит: 71 страницу, 33 рисунка, 4 таблицы, 15 источников.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ, СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ, ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА, МЕТОД ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ

Моделирование теплового поля в данной работе проводилось на примере платформы полезной нагрузки «Фотон-Амур».

Цель: смоделировать тепловое поле полезной нагрузки, с учетом теплопроводности корпуса.

Задачи:

- изучить способы отвода тепла от элементов МКА;
- изучить метод численных расчетов теплового поля;
- спроектировать корпус, предназначенный для теплоотведения;
- провести численное моделирование;
- провести анализ расчетов и эффективности корпуса.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Общая часть.....	10
1.1 Системы терморегулирования космического аппарата	10
1.2 Модели отказов системы терморегулирования	14
1.3 Методы теплового анализа	15
1.3.1 Структура математической модели теплового поля	15
1.3.2 Испытания на вакуумных установках	31
1.4 Выбор САПР для проектирования теплоотводящего корпуса.....	32
2 Проектная часть.....	35
2.1 Проектирование корпуса	35
2.2 Расчет методом тепловых балансов.....	47
2.3 Установка корпуса на ПН	54
2.4 Технологическая карта.....	56
3 Экономическая часть	59
4 Техника безопасности.....	63
4.1 Основные понятия электробезопасности.....	63
4.2 Меры безопасности обслуживающего персонала и посторонних лиц	64
4.3 Специфика поражающего действия электрического тока.....	64
Заключение.....	67
Примечание	67
Библиографический список.....	70

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- ВКР – выпускная квалификационная работа;
- ЕСКД – единая система конструкторской документации;
- КА – космический аппарат;
- МКА – малый космический аппарат;
- МЦХ – массо-центровочные характеристики;
- МЭБ – метод элементарных балансов;
- ПН – полезная нагрузка;
- ПО – программное обеспечение;
- ППН Ф-А – платформа полезной нагрузки «Фотон-Амур»;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СОТР – система обеспечения теплового режима;
- СПДС – система проектной документации для строительства;
- СПТР – система пассивного терморегулирования;
- СТР – система терморегулирования;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для того, чтобы снизить экономические затраты на выведение космических аппаратов (КА), ракетно-космическая индустрия нацелена на снижение массогабаритных характеристик, как следствие доля запуска малых космических аппаратов (МКА) постоянно растет, при этом число запусков тяжелых КА убывает. Основными преимуществами МКА бесспорно являются не только снижение затрат на выведение, но и дешевизна проектирования, изготовления, значительно меньшие сроки разработки. Помимо этого, такие космические аппараты помогают решать различные задачи как в научной и образовательной сфере, так и в сфере бизнеса. Для подобных задач проектируются отнюдь не только отдельные единицы спутников, но и целые универсальные платформы. Одной из таких платформ является платформа CubeSat, которая за счет своей унификации позволяет еще больше снизить затраты на производство МКА и уменьшить сроки разработки и создания [1]. CubeSat – это формат малых спутников, в форме куба с длиной ребер 10 см и массой не более 1,33 кг. КА, спроектированный в таком формате, обозначается как 1U. Помимо этого стандарт CubeSat допускает объединение нескольких таких кубов в составе одного спутника [2].

Для решения таких задач как: исследование ультрафиолетовых, инфракрасных, электромагнитных излучений; наблюдение поверхности Земли космическими средствами; испытание новой нано- или микроэлектроники; испытание полупроводниковых приборов зачастую используют именно универсальные платформы. Необходимо четко понимать какие именно процессы протекают во время работы малых космических аппаратов при условиях космического пространства, так как от этого зависит успех выполнения миссии [1].

Будучи за границами атмосферы планеты, МКА является объектом, тепловое поле которого зависит от множества факторов. Основными факторами являются: внешние тепловые потоки (солнечное излучение, излучение, отра-

женное планетой); характеристики поверхностей аппарата; местоположение и ориентация МКА в пространстве (так как при разной ориентации одной и той же поверхности относительно внешних тепловых потоков, будет разная температура); тепловыделение и энергопотребление бортовой аппаратуры; а также ряд других факторов [3]. В общем случае КА на низкой околоземной орбите непрерывно получает тепло от следующих источников: прямое солнечное излучение; альбедо, или отраженное от планеты солнечное излучение; собственное излучение планет; внутренние источники: приборы КА (полезная нагрузка); излучение от космического аппарата, уходящее в космос.

Большинство элементов КА работоспособны лишь в определенных температурных диапазонах, а тепловые воздействия существенно влияют на свойства материалов, выходные характеристики оборудования, величины температурных деформаций, прочностные характеристики конструкции, срок активного существования КА. Для обеспечения допустимых (рабочих) температур разрабатывается система обеспечения теплового режима (СОТР), что в свою очередь является сложной научно-технической задачей. СОТР является совокупностью разнообразных средств, устройств и методов их взаимодействия, которые регулируют внутренние и внешние тепловые процессы. [5]

Цель данной работы – разработка корпуса и моделирование теплового поля электронной платы наноспутника в условиях космоса на примере универсальной платформы полезной нагрузки «Фотон-Амур» (ППН Ф-А). Для чего были поставлены следующие задачи:

- проанализировать способы отвода тепла от электронных компонентов МКА;
- изучить методы расчета тепловых полей;
- спроектировать корпус для ППН Ф-А, обеспечивающий теплоотведение;
- провести расчет эффективности теплоотведения методом тепловых балансов.

Полезная нагрузка «Фотон-Амур» реализуется Амурским государственным университетом в рамках студенческого научно-образовательного проекта. ППН Ф-А спроектирована для проведения испытаний экспериментальных образцов фото-резисторов и фото-диодов в условиях космоса.

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1 Системы терморегулирования космического аппарата

Система обеспечения теплового режима наряду с другими служебными системами КА является одной из важнейших систем обеспечения жизненного цикла космического аппарата. Задачей СОТР является поддержание в течение всего назначенного срока существования КА температуры элементов его конструкции, приборов служебной и научной аппаратуры в диапазоне, обеспечивающем штатное, безаварийное их функционирование и, соответственно успешное решение поставленной перед аппаратом задачи. Решение этой задачи сводится к организации отвода выделяемого на борту КА тепла от его источников и поступающего от внешних источников излучения, перераспределения его по конструкции аппарата и сбросу излучением в космическую среду [6].

Обычно СОТР состоит одновременно из двух типов средств терморегулирования: средства активного регулирования тепловых процессов, которые расходуют энергию КА, такие средства называют системой терморегулирования (СТР); средства пассивного терморегулирования (СПТР), которые в свою очередь не требуют затрат энергии КА. СТР может включать в себя: вентиляционные устройства, жидкостной контур с теплообменными устройствами и средствами регулирования тепловых потоков, активные средства регулирования лучистого теплообмена и т. д. СПТР – это, как правило, элементы конструкции, обеспечивающие заданные параметры теплообмена излучением и теплопроводностью (это могут быть как терморегулирующие покрытия, теплоизоляция и теплозащита, а так же некоторые варианты компоновки). В некоторых ситуациях СОТР может состоять только из СПТР, так зачастую происходит при проектировании МКА, так как при проектировании крупных КА пассивных систем терморегулирования будет недостаточно [5].

Основными факторами, определяющими выбор СОТР, являются:

1. область космического пространства, в которой предполагается эксплуатация КА;
2. требования к тепловому режиму;
3. внутренние тепловыделения;
4. программа ориентации;
5. конструктивные особенности КА [5].

К СПТР относятся все тела и вещества, материал которых обладает определенными теплофизическими свойствами и термооптическими характеристиками. Это – удельные свойства, зависящие только от температуры, и интегральные, зависящие от линейных размеров тела, например от толщины теплопроводящей прокладки между разнонагретыми элементами конструкции КА, от плотности укладки мата ЭВТИ (экранно-вакуумной теплоизоляции), от чистоты и цвета излучающей поверхности [6].

Система пассивной терморегуляции КА не требует для выполнения своей функции затрат энергии, поскольку используются только их стационарные свойства и характеристики: теплопроводность и теплоемкость материала, из которого они изготовлены, поглощательная и излучательная способности их поверхностей [6].

В СПТР используют для поддержания заданной температуры КА:

- тепловую термоизоляцию;
- терморегулирующие покрытия;
- оптимальное расположение элементов КА относительно внешних источников тепла [7].

Пассивные элементы, используемые для создания СОТР КА, относительно просты, их характеристики и свойства достаточно точно определены в лабораторных исследованиях, однако в своей совокупности с их помощью нельзя, исключая КА простейшей конструкции, обеспечить высокую точность поддержания заданного теплового режима. Все терморегулирующие материалы и покрытия можно условно разделить на четыре класса [6]:

- «Солнечные отражатели» - поверхности материалов и покрытия, которые хорошо отражают падающую солнечную энергию и одновременно обладают высокой излучательной способностью в инфракрасной области спектра;

- «Солнечные поглотители» - поверхности материалов и покрытия, которые поглощают падающее солнечное излучение и одновременно обладают низкой излучательной способностью в инфракрасной области спектра;

- «Истинные отражатели» - поверхности материалов и покрытия, обладающие высокой отражательной способностью во всем интервале спектра от ультрафиолетовых лучей до инфракрасной области, т.е. имеющие;

- «Истинные поглотители» - поверхности материалов и покрытия, обладающие высокой поглощательной способностью в области спектра от ультрафиолетовых лучей до далекой инфракрасной области [6].

Как правило, для КА используют наряду с пассивными элементами системы обеспечения теплового режима активные методы. К активным системам терморегулирования относятся системы, обеспечивающие принудительный теплообмен элементов КА с окружающей средой [7].

СТР КА может осуществляться путем изменения:

- ориентации КА;
- внутреннего теплового сопротивления;
- термического сопротивления между отсеком с приборами и выносными наружными поверхностями, имеющими различные температуры;
- излучательной способности поверхности КА с помощью жалюзи.

Принудительный теплообмен КА с окружающей средой может обеспечиваться: электрическими и внутренними радиаторами с принудительным движением теплоносителя между ними.

На КА, как правило, используют как активные, так и пассивные элементы обеспечения теплового режима. Увеличивая число автономных контуров активной системы, добиваются повышения надежности. В таких контурах обычно циркулируют жидкие или газообразные теплоносители. При использовании нескольких теплоносителей на стыке контуров устанавливается теплообменник.

Например, тепло от тепловыделяющих приборов герметического отсека передается омывающему их газу, охлаждение которого происходит в жидкостном теплообменнике [7].

Регулирование тепловой мощности активной СТР может осуществляться за счет механического изменения площади радиаторов. Если площадь радиационных поверхностей неизменна, то регулирование осуществляется:

- изменением расхода теплоносителя;
- путем перепуска части теплоносителя через обводную (байпасную) линию;
- периодическим включением расхода теплоносителя;
- изменением ориентации КА относительно внешних тепловых источников [7].

Механическое регулирование теплозащитных свойств осуществляется автоматическими створками или экранами (например, надувными), затеняющими элементы пассивной СТР от внешних тепловых потоков, или разворотом КА в определенное положение [7].

Жалюзи представляют собой весьма эффективную конструкцию для изменения излучательной и поглощательной способности КА, в результате чего можно эффективно регулировать температуру внутри КА. Жалюзи могут быть выполнены в виде створок, барабана с прорезями и др [7].

В качестве отражателей используют покрытия белого цвета или зеркально полированные поверхности из алюминия, магния, стали, серебра, золота и других материалов. «Захолаживание» элементов КА или научных приборов до низких температур осуществляется специальными системами излучателей или активными системами охлаждения. При помощи системы радиаторов-излучателей, применяемых относительно низких уровнях значений тепловых потоков, обеспечивают уровень температур жидкого азота (78 К). Активная система охлаждения позволяет поддерживать уровень температуры жидкого гелия (около 4 К) [7].

1.2 Модели отказов системы терморегулирования

К настоящему времени существует несколько моделей отказов системы терморегулирования КА. В них используются различные показатели тепловых режимов КА:

- стационарных тепловых режимов;
- апериодических тепловых режимов;
- устойчивости работы СТР и др.

К показателям стационарных тепловых режимов относят:

- коэффициент теплоты использования теплопроизводительности контура СТР;
- коэффициент использования допустимой величины теплообмена с окружающей средой через элемент наружной поверхности;
- температуру характерных элементов с известным диапазоном [7].

Среди показателей апериодических тепловых режимов: эффективная теплоемкость КА; темпы остывания или время остывания на заданную величину от некоторого уровня и т.д [7].

В связи с тем, что в СТР могут возбуждаться автоколебания температуры, для КА находят границы устойчивости работы СТР. В одних моделях считается, что развивающийся во времени отказ наступает при превышении установленного значения коэффициента полноты использования теплопроизводительности контура СТР за счет деградации теплофизических характеристик терморегулирующих покрытий, что ухудшает эффективность радиационных теплообменников [7].

Некоторые тепловые воздействия для определяющих элементов СТР КА (таких, как радиационный теплообменник, наружная теплоизоляция, приборы внутри герметического отсека, элементы конструкции и т.п.), характеризующиеся предельно большими или предельно малыми значениями температур или других показателей, являются экстремальными. Для КА в целом и элементов КА экстремальным режимам соответствуют неблагоприятные сочетания таких

параметров, как изменение ориентации на орбите, режим максимального потребления энергии и др [7].

1.3 Методы теплового анализа

1.3.1 Структура математической модели теплового поля

Появление быстродействующих электронных вычислительных машин и их применение в передовых областях науки привело к быстрому развитию вычислительной математики и методов численного решения всех типов задач математической физики. Был сформулирован и начал широко распространяться в различных отраслях науки, в том числе и в теории теплообмена, метод математического моделирования, являющийся синтетическим методом исследования с помощью ЭВМ. Этот метод включает разработки моделей, численных методов, программного обеспечения, параметрических исследований и анализа результатов с последующим внедрением в практику. Математическое моделирование существенно преобразовало сам характер исследований в области теплообмена, установило новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами [6].

Имитационное моделирование теплового поля с помощью ЭВМ проводится раньше, чем осуществляется выход на тепловые, тепловакуумные и натурные испытания, на которые надо выходить не для отработки систем терморегулирования, а для подтверждения результатов математического моделирования [7].

При проектировании СОТР КА для решения задач внутреннего теплообмена используются практически все соотношения, описывающие процессы теплообмена, реализуемые во всех агрегатах СОТР и конструкции КА: теплопередачу, конвективный теплообмен, излучение, теплообмен в результате фазового перехода в веществах.

Этими агрегатами СОТР и КА являются: конструкция КА из различных материалов, магистрали газовых и жидкостных контуров передачи тепла от агрегата к агрегату, источники тепловыделения, радиационные теплообменники и излучающие тепло поверхности, тепловые трубы.

Структура расчета внешних тепловых потоков на поверхность КА включает в себя расчет падающих потоков от внешних источников излучения, расчет падающих на элемент поверхности лучистых потоков от соседних элементов поверхности КА, расчет падающих на элементы поверхности КА потоков, обусловленных многократными переотражениями лучистых потоков между соседними элементами поверхности КА. Расчет указанных потоков проводится с учетом взаимного экранирования элементов внешней поверхности. На поверхности КА выпуклой формы не происходит многократных отражений и затенений потоков излучения. Внешняя поверхность КА представляет собой совокупность плоских и криволинейных поверхностей. Их температура может изменяться как по координатам, так и по времени; радиационные характеристики (A_s – коэффициент поглощения, ε – степень черноты, ρ – коэффициент отражения поверхности и χ – коэффициент пропускания лучистой энергии) могут также изменяться в зависимости от угла падения, длины волны падающего излучения и температуры [6].

Простейшим примером математической модели описывающей энергобаланс при установившейся равновесной температуре поверхности КА, может служить конструкция контейнера, отводящего выделяемое в нем тепло, излучением в космос космических аппаратов «Луна-1» и «Луна-2». Эти аппараты представляли собой сферический герметичный контейнер, который заполнялся газом при давлении 0,13 Мпа [7].

Эта математическая модель имеет вид:

$$\varepsilon\sigma T^4 = q_{\text{вн}} + q_s + q_{\text{собр}}\varphi_1 + q_{\text{отр}}\varphi_2, \quad (1.1)$$

где ε – коэффициент излучения (степень черноты) излучающей поверхности контейнера;

σ – постоянная Стефана – Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^8$ Вт/(м²К⁴);

T – равновесная температура излучающей поверхности, К;

$q_{\text{вн}}$ – мощность тепловыделения аппаратуры в контейнере, Вт;
 $q_{\text{соб}}$ – средняя мощность собственного теплового излучения Земли, Вт;
 φ_1 – угловой коэффициент между поверхностью ИСЗ и планетой, определяющий долю собственного излучения планеты, попадающую на поверхность;
 $q_{\text{отр}}$ – средняя мощность отраженного Землей солнечного излучения, Вт;
 φ_2 – комбинированный угловой коэффициент, зависящий от взаимного положения поверхности, Солнца и планеты, определяет долю отраженной от планеты солнечной энергии, попадающую на рассматриваемую поверхность;

$$q_s = A_s S_0 F_M, \quad (1.2)$$

где A_s – коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью КА;

S_0 – плотность потока солнечного излучения у Земли, Вт/м²;

F_M – площадь проекции освещенной Солнцем поверхности КА на плоскость перпендикулярную направлению на Солнце, м² [7].

На тепловой режим объекта оказывают влияние внутренние тепловыделения аппаратуры и тепловое взаимодействие между элементами конструкции. Ниже представлены принципы построения математических моделей КА, их аппаратуры, элементов конструкции и оборудования [7].

Для расчета температур составляется математическая модель, в основу которой положена система дифференциальных уравнений. Уравнения получают из закона сохранения энергии при некоторых упрощающих условиях. Для расчета температур элементов конструкции, оборудования и теплоносителя рассчитываемый объект условно разбивается на конечное число изотермических узлов с сосредоточенной эффективной теплоемкостью и конечное число участков тракта циркуляции теплоносителя для каждого изотермического узла составляется уравнение теплового баланса:

$$(c \cdot m)_i \cdot \frac{dT}{d\tau} = Q1_i + Q2_i + Q3_i + Q4_i + Q5_i + Q6_i + Q7_i, \quad (1.3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n – количество изотермических элементов;

$(cm)_i$ – теплоемкость изотермического элемента, Дж/К;

T_i – температура изотермического элемента, К;

τ – текущее время, с;

$Q1_i$ – внутренние тепловыделения в i -м изотермическом элементе, Вт;

$Q2_i$ – тепловой поток между i -м изотермическим узлом и термостатируемыми элементами конструкции аппарата, Вт;

$Q3_i$ – тепловой поток, определяющий теплообмен i -го изотермического узла с другими изотермическими узлами, Вт;

$Q4_i$ – тепловой поток, определяющий теплообмен i -го изотермического узла с окружающим пространством, Вт;

$Q5_i$ – мощность, рассеиваемая в i -м изотермическом элементе управляемым электронагревателем, Вт;

$Q6_i$ – тепловой поток, поглощаемый или выделяемый в i -м изотермическом элементе при фазовом переходе, Вт;

$Q7_i$ – тепловой поток, вызванный теплообменом i -го изотермического элемента с теплоносителем, Вт [7].

Решение системы дифференциальных уравнений (1.3) дает изменение по времени температур расчетных узлов и температур теплоносителя на участках тракта циркуляции. Для решения системы дифференциальных уравнений теплового баланса используется метод Рунге – Кутты. При этом на каждом шаге интегрирования для определения температур теплоносителя решается система линейных алгебраических уравнений. Решение системы осуществляется методом исключения [7].

При необходимости определения температурного поля в установившемся режиме используется следующая система уравнений:

$$Q1_i + Q2_i + Q3_i + Q4_i + Q5_i + Q6_i + Q7_i = 0. \quad (1.4)$$

Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений, используется метод Ньютона [7].

Внутреннее тепловыделение в i -м узле $Q1_i$, определяется программой работы приборов и оборудования и, как правило представляет собой ступенчато меняющуюся по времени величину [7].

В общем случае рассчитываемые изотермические узлы могут иметь место различные циклограммы изменения по времени внутренних тепловыделений, при это для каждого узла количество участков циклограммы с различными значениями тепловыделений может быть различным [7].

В общем случае рассчитываемые изотермические узлы в тепловом отношении с термостатируемыми элементами конструкции аппарата, температура T_{Wj} которых либо постоянна, либо меняется по заданному закону. Температуры T_{Wj} могут быть заданы из анализа тепловых связей, взяты на основании результатов аналогичных расчетов, данных, полученных при испытаниях или эксплуатации аппаратов-аналогов. Использование понятия «термостатируемые элементы конструкции аппарата» позволяет вести тепловые расчеты отдельных частей аппарата независимо друг от друга. При это тепловой поток $Q2_i$ между расчетным i -м узлом и термостатируемыми элементами j -ми конструкции аппарата определяется выражением:

$$Q2_i = \sum_{j=1}^m \left[(T_{Wj} - T_i) \cdot P_{i-Wj} + \sigma \cdot (\varepsilon_{np} \cdot F)_{i-Wj} \cdot (T_{Wj}^4 - T_i^4) \right], \quad (1.5)$$

где m -количество термостатируемых элементов конструкции аппарата, температуры которых T_{Wj} различны, и с которыми имеет тепловую связь i -й узел;

T_{Wj} – температура j -го термостатируемого элемента конструкции КА;

P_{i-Wj} – проводимость кондуктивной связи между i -м изотермическим узлом и j -м термостатируемым элементом конструкции КА;

$(\varepsilon_{np} \cdot F)_{i-wj}$ – произведение приведенной степени черноты на площадь поверхности i -го узла, участвующего в теплообмене с j -м термостатируемым элементом конструкции аппарата;

σ – постоянная Стефана – Больцмана [7].

Тепловой поток $Q3_i$, определяющий теплообмен i -го изотермического узла с остальными узлами, определяется с учетом лучистой и кондуктивной составляющих по следующей формуле:

$$Q3_i = \sum_{k=1}^n \left[(T_k - T_i) \cdot P_{i-k} + \sigma \cdot (\varepsilon_{np} \cdot F)_{i-k} \cdot (T_k^4 - T_i^4) \right], \quad (1.6)$$

где n – общее количество изотермических узлов, с которыми в тепловом отношении связан i -й узел;

T_k – температура k -го изотермического узла;

P_{i-k} – проводимость кондуктивной связи между i -м и k -м изотермическими узлами;

$(\varepsilon_{np} \cdot F)_{i-k}$ – произведение приведенной степени черноты на площадь поверхности i -го узла, участвующей в теплообмене с k -м узлом [7].

Тепловой поток $Q4_i$, определяющий теплообмен i -го узла с окружающим пространством, вычисляется как сумма тепловых потоков через теплоизоляцию, закрывающую поверхность i -го узла, участки поверхности, не закрытые теплоизоляцией и по узлам крепления элементов наружного оборудования и конструкции, установленных на i -м изотермическом узле по следующей методике:

$$Q4_i = Q_{TI_i} + Q_{ноб_i} + Q_{O_i}. \quad (1.7)$$

Тепловой поток через теплоизоляцию, закрывающую поверхность i -го узла, определяется по уравнению:

$$Q_{ТИ_i} = F_{ТИ_i} \cdot \frac{(T_{ТИ_i} - T_i)}{R_{уд.ТИ_i}}, \quad (1.8)$$

где $F_{ТИ_i}$ – площадь поверхности теплоизоляции, закрывающей i -й изотермический узел;

$R_{уд.ТИ_i}$ – удельное термическое сопротивление ЭВТИ;

$T_{ТИ_i}$ – температура наружной поверхности теплоизоляции.

Удельное термическое сопротивление ЭВТИ:

$$R_{уд.ТИ_i} = 1 / \left[A \cdot (T_{ТИ_i} - T_i) + B \cdot (T_{ТИ_i}^2 - T_i^2) \cdot (T_{ТИ_i} + T_i) \right] \quad [7]. \quad (1.9)$$

Коэффициенты A и B , учитывающие теплопроводность и передачу тепла излучением, соответственно можно определить по следующим формулам:

$$A = \frac{1}{\left[R_0 \cdot (T_{ТИ_i}^* + T_i) \right]} - B \cdot (T_{ТИ_i}^{*2} + T_i^{*2}); \quad (1.10)$$

$$B = \frac{\sigma}{\left[(\varepsilon_{ТИ}^{-1} + \varepsilon_W^{-1} - 1) + N \cdot (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1) \right]}, \quad (1.11)$$

где N – количество экранов;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты наружной и внутренней поверхности экранов;

$\varepsilon_{ТИ}, \varepsilon_W$ – степени черноты наружной и внутренней поверхности теплоизоляции соответственно;

R_0 – удельное термическое сопротивление ЭВТИ, определенное при температурах $T_{ТИ_i}^*$ и T_i^* , берется по данным отраслевого стандарта на ЭВТИ [7].

Температура наружной поверхности теплоизоляции определяется как:

$$Q_{S_{ТИ_i}} + \sum Q_{ОКР_j_{ТИ_i}} - Q_{ТИ_i} - Q_{ИЗЛ_{ТИ_i}} + Q_{ПЛ_{ТИ_i}} = 0, \quad (1.12)$$

где $Q_{S_{ТИ_i}}$ – тепловой поток солнечного излучения, поглощаемый поверхностью теплоизоляции;

$Q_{ОКР_j_{ТИ_i}}$ – лучистый тепловой поток от j-го элемента оборудования или конструкции, поглощаемый поверхностью теплоизоляции;

$Q_{ТИ_i}$ – тепловой поток через теплоизоляцию;

$Q_{ИЗЛ_{ТИ_i}}$ – тепловой поток, излучаемый наружной поверхностью теплоизоляции;

$Q_{ПЛ_{ТИ_i}}$ – суммарный тепловой поток от планеты, поглощаемый поверхностью теплоизоляции;

m – общее количество окружающих элементов конструкции или оборудования от которых поступает лучистый тепловой поток на участок наружной поверхности теплоизоляции [7].

Перечисленные тепловые потоки вычисляются по следующим формулам:

$$Q_{S_{ТИ_i}} = A_{S_{ТИ_i}} \cdot F_{ТИ_i} \cdot \overline{F_{M_{ТИ_i}}} \cdot S_O; \quad (1.13)$$

$$Q_{ПЛ_{ТИ_i}} = \left(\Phi_{ТИ}^\varepsilon \cdot \varepsilon_{ТИ_i} + \Phi_{ТИ}^S \cdot A_{S_{ТИ_i}} \right) \cdot F_{ТИ_i}; \quad (1.14)$$

$$Q_{ИЗЛ_{ТИ_i}} = \sigma \cdot \varepsilon_{ТИ_i} \cdot F_{ТИ_i} \cdot T_{ТИ_i}^4; \quad (1.15)$$

$$Q_{ОКР_j_{ТИ_i}} = \sum \varphi_{ТИ_j-i} \cdot F_{M_j} - S_O \cdot F \left[A_{S_j} \cdot \varepsilon_{ТИ_i} + (1 - A_{S_j}) \cdot A_{S_{ТИ_i}} \right], \quad (1.16)$$

где $A_{S_{ТИ}}$, $\varepsilon_{ТИ}$ – термические характеристики наружной поверхности теплоизоляции;

$\overline{F_{M_{ТИ_i}}}$ – солнечный мидель поверхности тепловой изоляции относительный;

$F_{ТИ_i}$ – площадь наружной поверхности теплоизоляции;

S_0 – плотность потока солнечного излучения;

$\varphi_{ТИ_{i-j}}$ – угловой коэффициент между i -й поверхностью теплоизоляции j -м элементом конструкции КА;

$\Phi_{ТИ}^\varepsilon$ – плотность потока собственного излучения планеты;

$\Phi_{ТИ}^S$ – плотность потока, отраженного от планеты солнечного излучения [7].

Суммарный тепловой поток через участки поверхности, не закрытые теплоизоляцией, определяются по формуле:

$$Q_{O_i} = \sum^m (Q_{SO_i} + Q_{Пл O_i} + \sum Q_{ОКР O_{i-j}} - Q_{ИЗЛ O_i}), \quad (1.17)$$

где Q_{SO_i} – тепловой поток солнечного излучения, поглощаемый поверхностью i -го узла, не закрытой теплоизоляцией;

$Q_{Пл O_i}$ – лучистый тепловой поток от планеты, поглощаемый поверхностью i -го узла, не закрытой теплоизоляцией;

$Q_{ОКР O_{i-j}}$ – лучистый тепловой поток от j -го элемента наружного оборудования, поглощаемый поверхностью i -го узла, не закрытой теплоизоляцией;

$Q_{ИЗЛ O_i}$ – тепловой поток, излучаемый поверхностью i -го узла, не закрытой теплоизоляцией;

m – количество участков поверхности i -го узла, не закрытых теплоизоляцией [7].

Тепловые потоки Q_{SO_i} , $Q_{Пл O_i}$, $Q_{ОКР O_{i-j}}$, $Q_{ИЗЛ O_i}$ определяются по формулам (13), (14), (15), (16), с заменой индексов «ТИ _{i} » на «O _{i} ». Параметры, входящие в формулу, относятся к поверхностям, не закрытым теплоизоляцией [7].

С целью уменьшения количества изотермических узлов, элементы наружного оборудования, незначительно влияющие на тепловой режим аппарата, в качестве изотермических узлов не задаются. Тепловое воздействие от этих элементов учитывается при рассмотрении теплообмена с окружающим пространством как составляющая теплового потока $Q_{H\text{ ОБ}_i}$ [7].

Суммарный тепловой поток от элементов наружного оборудования и конструкций, установленных на рассматриваемом изотермическом узле, определяется уравнением:

$$Q_{H\text{ ОБ}_i} = \sum_{k=1}^n (Q_{\lambda k-i} + Q_{\varepsilon k-i}), \quad (1.18)$$

где $Q_{\lambda k-i}$ – кондуктивный тепловой поток по узлам крепления k -го элемента наружного оборудования;

$Q_{\varepsilon k-i}$ – лучистый тепловой поток между k -м элементом наружного оборудования и i -м изотермическим узлом;

n – общее количество элементов наружного оборудования и конструкции, установленных на i -м узле [7].

Тепловые потоки $Q_{\lambda k-i}$ и $Q_{\varepsilon k-i}$ определяются по формулам:

$$Q_{\lambda k-i} = (T_k - T_i) \cdot P_{ik}; \quad (1.19)$$

$$Q_{\varepsilon k-i} = \sigma \cdot (\varepsilon \cdot F)_{ik} \cdot (T_k^4 - T_i^4). \quad (1.20)$$

Температура k -го элемента наружного оборудования T_k определяется из уравнений теплового баланса по рассматриваемой выше методике [7].

Используя уравнения (1.7), ..., (1.20), для каждого изотермического узла, находящегося в теплообмене с окружающим пространством, можно получить зависимость теплового потока Q_{4i} , от температуры изотермического узла и

времени, т.е. зависимость типа $Q4_i(T_i\tau)$. Тепловые потоки $Q4_i(T_i\tau)$, передающие теплообмен i -го узла с окружающим пространством, рассчитываются предварительно и задаются в виде многочленного полинома:

$$Q4_i = A4 \cdot T_i^4 + A3 \cdot T_i^3 + A2 \cdot T_i^2 + A1 \cdot T_i + A0, \quad (1.21)$$

где свободный член $A0$ может зависеть от времени:

$$A0 = B4 \cdot \tau^4 + B3 \cdot \tau^3 + B2 \cdot \tau^2 + B1 \cdot \tau + B0 \quad [7]. \quad (1.22)$$

Коэффициенты $A4, \dots, A0$ и $B4, \dots, B0$ этих полиномов являются исходными данными программной реализации полиномиальной модели (в подпрограмме $Q4_j$) [7].

Тепловой поток $Q5_i$ представляет собой мощность, рассеиваемую в i -м изотермическом элементе электронагревателем, управляемым по температуре. Управление электрообогревом i -го узла может осуществляться как по температуре T_i данного узла, так и по температуре T_k любого другого изотермического узла. При понижении температуры изотермического узла ниже нижнего предела происходит включение электрообогрева, при повышении выше верхнего предела регулирования происходит выключение электрообогрева [7].

$Q6_i$ – тепловой поток, поглощаемый или выделяемый в i -м изотермическом узле при фазовом переходе. Он позволяет учесть наличие вещества, имеющего фазовый переход (например, плавление, затвердевание),

Для определения $Q6_i$ задается масса плавящегося вещества (ПВ) $m_{ПВ}$, теплоемкость жидкой фазы $C_{Ж}$, теплоемкость твердой фазы $C_{Т}$, температура плавления $T_{Пл}$, температура затвердевания $T_{ТВ}$, теплота плавления g . На каждом шаге интегрирования определяется количество твердой и жидкой фазы. Если ПВ полностью в жидком состоянии, то $Q6_i = 0$. Если начался фазовый переход и имеется как твердая, так и жидкая фаза, то $Q6_i$ определяется из уравнения:

$$Q_{6_i} + Q_{\Sigma i} = 0, \quad (1.23)$$

где $Q_{\Sigma i}$ – сумма всех тепловых потоков, поступающих к i -му изотермическому узлу [7].

При этом из (1.23) следует, что, что идет процесс плавления, то пока он не завершится, $T_i = T_{\text{пл}}$; а если идет процесс затвердевания, то, пока он не закончится $T_i = T_{\text{ТВ}}$ [7].

Для определения температур теплоносителя при известных температурах изотермических узлов T_i решается система n линейных уравнений теплового баланса вида (4.22), (4.23), (4.29), где n – количество участков тракта циркуляции теплоносителя. Вид уравнения теплового баланса для теплоносителя на каждом участке определяется типом данного участка тракта циркуляции теплоносителя [7].

Участки трактов циркуляции теплоносителя могут быть следующих типов:

1. Участки, на которых теплоноситель участвует в теплообмене с одним изотермическим узлом. Уравнение теплового баланса в этом случае имеет вид:

$$k_j \cdot (T_{\text{ТК}} - T_i) - (c_p \cdot G_T) \cdot (T_{\text{ТК}} - T_{T_j}) = 0, \quad (1.24)$$

где i – номер изотермического узла;

j – номер участка тракта циркуляции теплоносителя;

k_j – коэффициент теплопередачи между теплоносителем, циркулирующим по j -му участку тракта циркуляции и i -м изотермическим узлом;

$T_{\text{ТК}}$ – температура теплоносителя на входе в j -й участок тракта циркуляции;

T_{T_j} – температура теплоносителя на выходе из j -го участка тракта циркуляции;

T_i – температура i -го изотермического узла;
 $(c_p \cdot G_T)$ – массовый расход теплоносителя на j -м участке тракта циркуляции теплоносителя [7].

При этом уравнение теплового потока между i -м изотермическим узлом и теплоносителем на j -м участке тракта циркуляции:

$$Q_{T_i} = k_j \cdot (T_{TK} - T_i) = 0 \quad [7]. \quad (1.25)$$

2. Участки, на которых теплоноситель участвует в теплообмене с несколькими изотермическими узлами. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$k_j \cdot (T_{TK} - T_{PP_j}) - (c_p \cdot G_T) \cdot (T_{TK} - T_{T_j}) = 0 \quad [7]. \quad (1.26)$$

Тепловой поток между i -м изотермическим узлом и теплоносителем на j -м участке тракта определяется по формуле:

$$Q_{T_i} = \alpha_i \cdot F_{BH_i} \cdot (T_{T_j} - T_{PP}), \quad (1.27)$$

где

$$T_{T_j} = T_{PP_j} - \frac{(T_{PP_j} - T_{TK}) \cdot k_j}{\sum \alpha_i \cdot F_{BH_i}}; \quad (1.28)$$

\hat{T}_{T_j} – приведенная температура теплоносителя на j -м участке тракта циркуляции;

$$T_{\text{пр}j} = \frac{\sum (\alpha_i \cdot F_{\text{BH}_i} \cdot T_i)}{\sum (\alpha_i \cdot F_{\text{BH}_i})}; \quad (1.29)$$

Коэффициент теплопередачи k_j в этом случае определяется по формуле:

$$k_j = (c_p \cdot G_T)_j \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{\sum \alpha_{T_j} \cdot F_{\text{BH}_i}}{(c_p \cdot G_T)_j} \right) \right]; \quad (1.30)$$

α_i – коэффициент теплоотдачи от i -го узла к теплоносителю;

F_{BH_i} – площадь поверхности i -го узла, омываемая теплоносителем;

$T_{\text{пр}j}$ – приведенная температура узлов для j -го участка тракта циркуляции;

$(c_p \cdot G_T)_j$ – массовый расход теплоносителя на j -м участке тракта циркуляции теплоносителя [7].

3. Участки, на которых происходит слияние потоков теплоносителя.

Уравнения теплового баланса в этом случае имеет вид:

$$\sum_k (c_p \cdot G_T)_k \cdot T_{\text{ТК}} - (c_p \cdot G_T)_j \cdot T_{\text{T}_j} = 0, \quad (1.31)$$

где $(c_p \cdot G_T)_k$ – массовые расходы теплоносителя на k -х участках трактов циркуляции (на входе в j -й участок);

$(c_p \cdot G_T)_j$ – суммарный массовый расход теплоносителя после слияния потоков теплоносителя;

$T_{\text{ТК}}$ – температуры теплоносителя, поступающего на участок слияния;

T_{T_j} – температура теплоносителя на выходе из участка слияния потоков

[7].

Уравнение теплового баланса для КА, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающим космическим пространством, имеет вид:

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{\text{внутр}} + Q_{\text{солн}} A_s + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{соб}} A_{\text{соб}} + Q_{\text{мол}} - Q_{\text{изл}}, \quad (1.32)$$

где $Q_{\text{соб}}$ – энергия собственного излучения планеты;

$Q_{\text{внутр}}$ – суммарные внутренние тепловые потоки;

$Q_{\text{солн}}$ – прямой солнечный тепловой поток, падающий на поверхность КА;

$Q_{\text{отр}}$ – солнечная энергия, отраженная от планеты;

$Q_{\text{мол}}$ – тепловая энергия, выделяющаяся за счет столкновения поверхности КА с отдельными атомами и молекулами атмосферы планеты;

$Q_{\text{изл}}$ – тепло, излучаемое КА;

A_s – коэффициент поглощения солнечной радиации;

$A_{\text{соб}}$ – коэффициент поглощения собственного излучения планеты [7].

Из уравнений видно, что тепловые потоки в процессе движения КА изменяются во времени. Это делает тепловые режимы нестационарными, а их расчеты – чрезвычайно сложными [7].

Все вышеперечисленное относится к КА герметичного исполнения, для моделирования теплового поля КА негерметичного исполнения может быть использован метод элементарных балансов (МЭБ). Метод элементарных балансов – это модернизированный метод конечных разностей в случае трехмерного тела, где физические характеристики которого являются функцией температуры. Граничные условия могут являться функцией, зависящей от времени или быть заданными любым другим способом.

Трехмерное тело разбивается на конечное множество достаточно малых параллелепипедов со сторонами Δx , Δy , Δz . Контуры тела также описываются с помощью серии таких параллелепипедов, с соответствующим приближением. Углы параллелепипедов являются расчетными точками. Температура в расчет-

ной точке в данный момент времени обозначается через t . Температура в данный момент времени в соседних точках, находящихся на расстоянии Δx , Δy , Δz , обозначается через $t_{x+\Delta x}$, $t_{y+\Delta y}$, $t_{z+\Delta z}$. Температура расчетной точки в последующий момент времени, т.е. через промежуток $\Delta \tau$, обозначается $t_{\tau+\Delta \tau}$. Начальное распределение температур в теле задано. Известен закон изменения физических характеристик и граничные условия. Температура внутри малых параллелепипедов изменяется по линейному закону [8].

Для упрощения моделирования применяют специализированное ПО (системы автоматизированного проектирования, среды численного моделирования) (рисунок 1). Как правило, такое ПО может помочь изучать модель не только с точки зрения количественных, но и качественных результатов. К количественным результатам можно отнести: изменение давления, температура, наибольшая и наименьшая температура компонентов. Такие результаты помогают определить является ли конструкция КА оптимальной. К качественным результатам относятся: модель воздушного потока, картина теплового поля. С помощью подобных результатов можно вычислить локализацию проблемных участков. Использование такого ПО предполагает проектирование 3Д модели, а затем при помощи комплекса инструментов происходит тепловое моделирование всех частей конструкции.

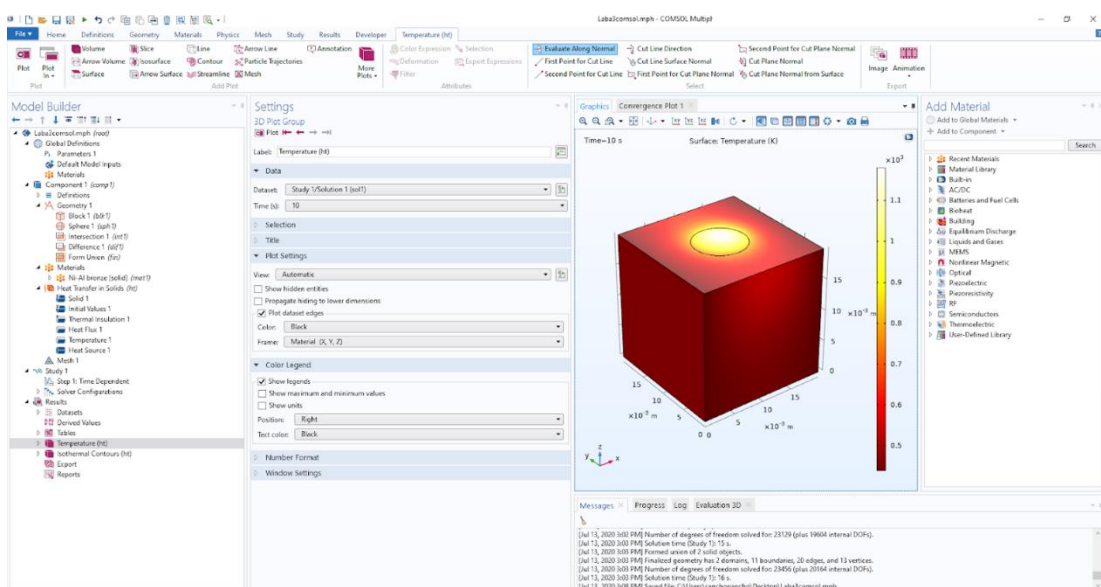


Рисунок 1.1 – Пример теплового анализа в COMSOL Multiphysics

1.3.2 Испытания на вакуумных установках

Для гарантии безотказной работы КА проводят комплексные наземные испытания с имитацией условий космического пространства. Одними из таких условия являются: вакуум, температура, изменяющаяся от -270°C до $180-450^{\circ}\text{C}$, в зависимости от местоположения КА на орбите. Такие факторы существенно влияют на материалы и покрытия КА.

Имитаторы космического пространства (рисунок 2) для проведения испытаний моделируют следующие условия космоса: вакуум, широкий диапазон температур, солнечное излучение, собственной излучение планеты или других объектов.

Подобные установки являются крайне сложными и комплексными, а также имеют высокие требования к конструкции. В их состав, в общем случае, входят:

- Система вакуумной откачки;
- Система измерения и/или регулирования уровня вакуума;
- Система терморегулирования;
- Система позиционирования;
- Автоматизированная система управления;
- Вакуумная камера.

Основной задаче имитаторов космического пространства является определение максимальных и минимальных температур конструкции и оборудования КА, которые могут возникнуть в ходе эксплуатации, помимо этого в задачу входит определение эффективности спроектированной СОТР.



Рисунок 1.2 – Пример вакуумной установки компании ERSTEVAK [10]

Проводить испытания КА на подобных установках является дорогостоящим и сложным мероприятием. Имитаторы космического пространства зачастую не удовлетворяют технологичности процесса испытаний и не обладают полным набором средств измерений. Все это создает проблему для небольших организаций или университетов, которые занимаются проектированием МКА. Поэтому для анализа тепловых процессов целесообразным можно считать моделирование теплового поля с помощью математических методов и ЭВМ.

1.4 Выбор САПР для проектирования теплоотводящего корпуса

На данный момент популярными и распространёнными в России являются следующие системы автоматизированного проектирования (САПР): «Компас-3D» и «SolidWorks».

«Компас-3D» – программное обеспечение, являющееся частью семейства САПР, принадлежащего компании «Аскон», которое обладает всеми возможностями оформления документации по стандартам единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и системы проектной документации для строительства (СПДС).

Удобной функцией, данной САПР является то, что все стандартные виды строятся автоматически и в проекционной связи. Между надписью на чертеже и данными о 3D модели есть синхронизация, поэтому такие вещи как обозначения, масса, название ставятся автоматически. Так же есть связь модели и спецификации, от чего оформление документации становится значительно проще.

Система «Компас-3D» предназначена для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей (в том числе, деталей, формируемых из листового материала путём его гибки) и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе проектированного ранее прототипа. Так же в «Компас-3D» есть библиотека стандартных изделий.

Помимо этого «Компас-3D» включает в себя следующие составляющие: система трехмерного моделирования, система автоматизированного проектирования, модуль формирования спецификаций, собственное математическое ядро [11].

SolidWorks — это система гибридного параметрического моделирования, которая предназначена для проектирования деталей и сборок в трехмерном пространстве с возможностью проведения различных видов экспресс-анализа, а также оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД.

Отличительными особенностями SolidWorks являются:

- твердотельное и поверхностное параметрическое моделирование;
- полная ассоциативность между деталями, сборками и чертежами;
- богатый интерфейс импорта/экспорта геометрии;
- экспресс-анализ прочности деталей и кинематики механизмов;
- специальные средства по работе с большими сборками;
- простота в освоении и высокая функциональность;
- гибкость и масштабируемость;

- 100-процентное соблюдение требований ЕСКД;
- русскоязычный интерфейс и документация [12].

В SolidWorks можно одинаково удачно работать как с твердыми телами, так и с поверхностями. Как правило, деталь представляет собой твердое тело, поверхность либо сочетание твердого тела и набора поверхностей. Процесс построения 3D-модели основывается на создании элементарных геометрических примитивов и выполнении различных операций между ними. Подобно конструктору LEGO модель набирается из стандартных элементов (блоков) и может быть отредактирована путем либо добавления (удаления) этих элементов, либо изменения характерных параметров блоков [12].

3D-модель содержит наиболее полное описание физических свойств объекта (объем, масса, моменты инерции) и дает проектанту возможность работы в виртуальном 3D-пространстве, что позволяет на самом высоком уровне приблизить компьютерную модель к облику будущего изделия, исключая этап макетирования [12].

Сравнивая две данные САПР, по-моему мнению, наиболее интуитивно понятным и простым в использовании является «Компас-3D». Помимо этого, программы семейства «Компас» автоматически генерируют ассоциативные виды трёхмерных моделей (в том числе разрезы, сечения, местные разрезы, местные виды, виды по стрелке, виды с разрывом). Все они ассоциированы с моделью: изменения в модели приводят к изменению изображения на чертеже, что значительно упрощает оформление итоговых чертежей, в качестве графической части для этой выпускной бакалаврской работы.

2 ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Проектирование корпуса

В качестве пассивного терморегулирующего элемента решено спроектировать корпус, отвечающий следующим требованиям:

- 1) Высокая теплопроводность материала;
- 2) Малая масса;
- 3) Простота производства;
- 4) Экономичность.

Корпус проектируется с учетом размеров вычислительной платы и платы фото-резисторов (рисунок 2.1, 2.2).

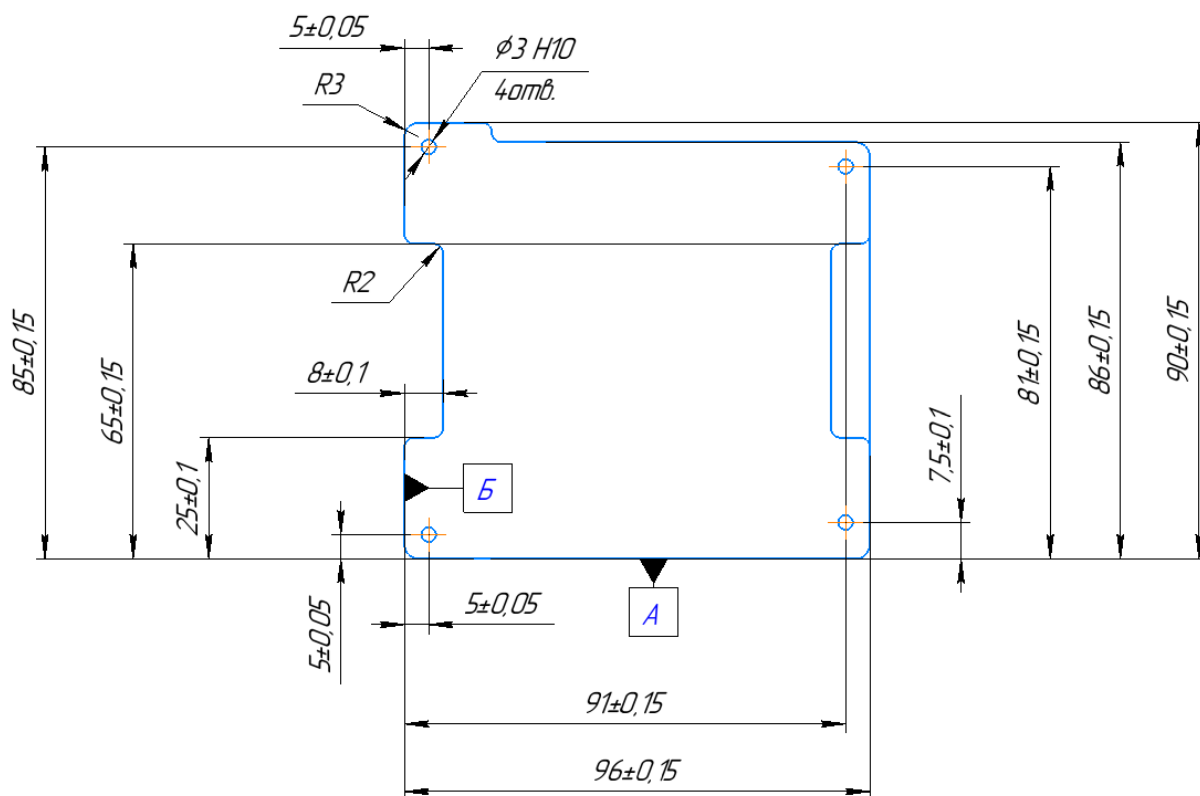


Рисунок 2.1 – Размеры вычислительной платы

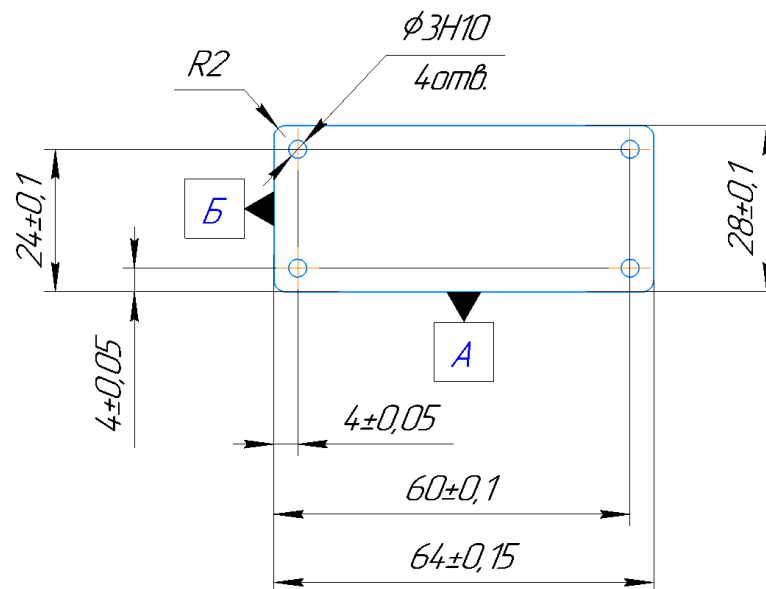


Рисунок 2.2 – Размеры платы с фото-резисторов

Учитывая близкое расположение электронных элементов к краю вычислительной платы (что видно на рисунке 2.3) и цель максимальной эффективности при минимальной массе, толщину стенок корпуса принимаем 1,5 мм; из-за особенностей установки ПН «Фотон-Амур 2.0» на платформе CubeSat (вариант расположения ПН показан на рисунке 2.4), а именно ограничений по высоте, возьмем высоту корпуса в пределах до 30 мм.

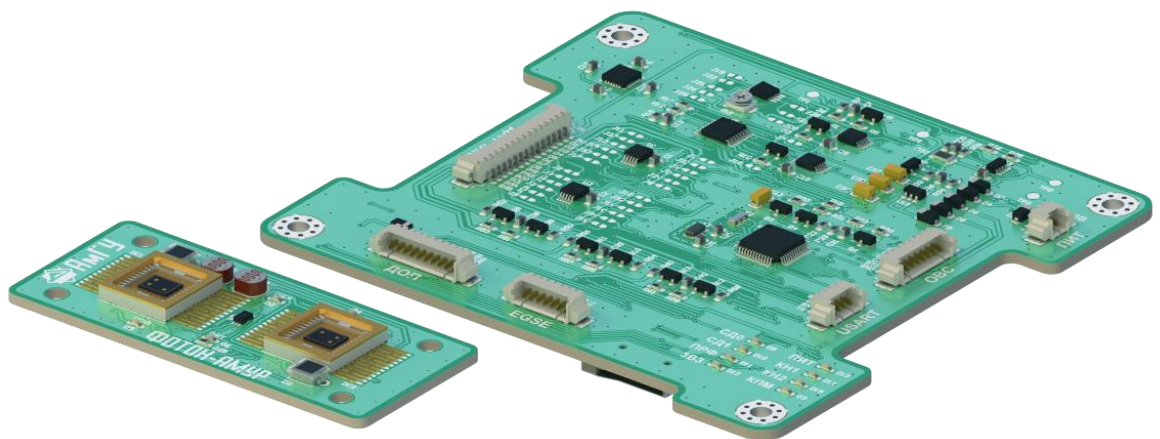


Рисунок 2.3 – Расположение электронных компонентов на платах ПН

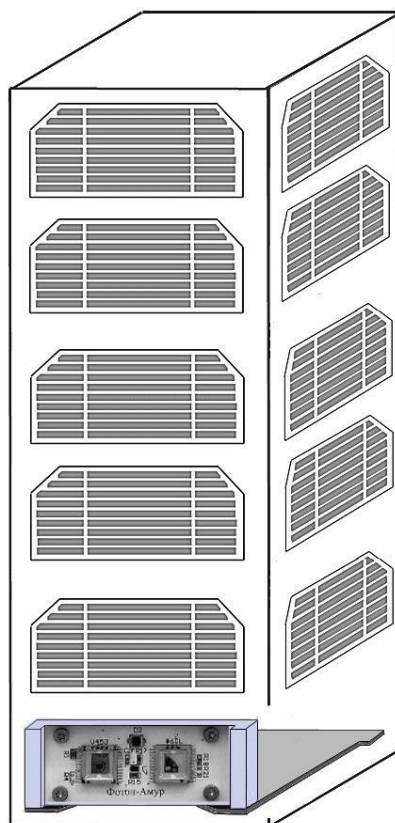


Рисунок 2.4 – Расположение установленной ПН «Фотон-Амур»
на платформе CubeSat

Спроектируем несколько вариантов корпуса и выберем оптимальный по массе и сложности изготовления. Проектирование можно условно разделить на несколько этапов: создание основания, внешних стенок, отверстий под кабели, верхней часть корпуса, отверстия для подключения платы фото-резисторов и фото-диодов.

Этапы проектирования 3Д модели первого корпуса:

- 1) Создание «эскиза» основания, с учетом сквозных отверстий под стойки и «выдавливание» его по оси z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.5);

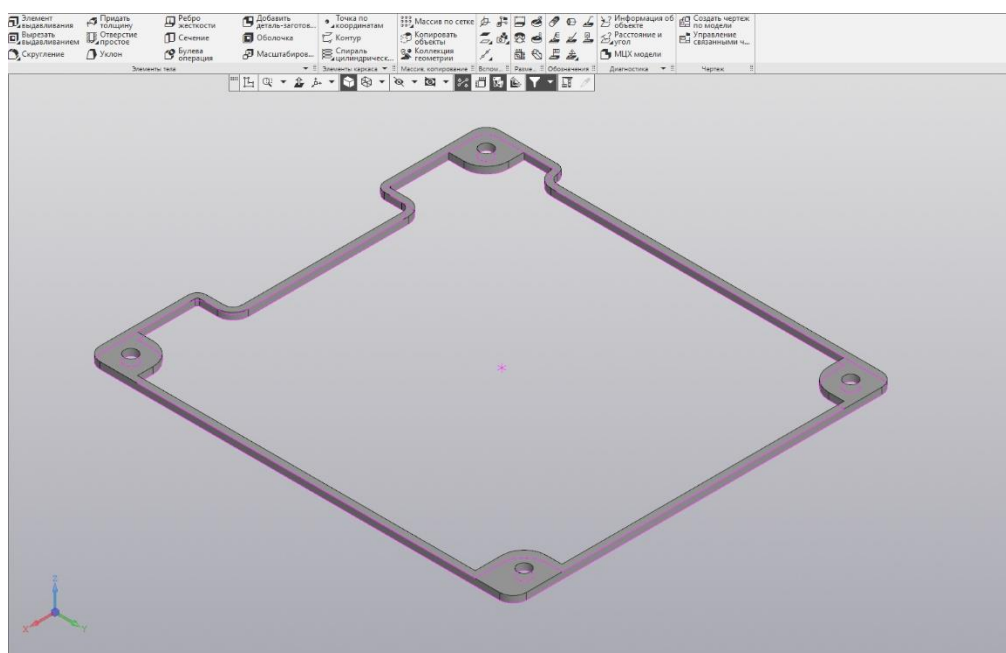


Рисунок 2.5 – Создание нижнего основание первого корпуса

- 2) Создание «эскиза» стенок толщиной 1,5 мм и «выдавливание» по оси z на расстояние 26,5 мм (рисунок 2.6);

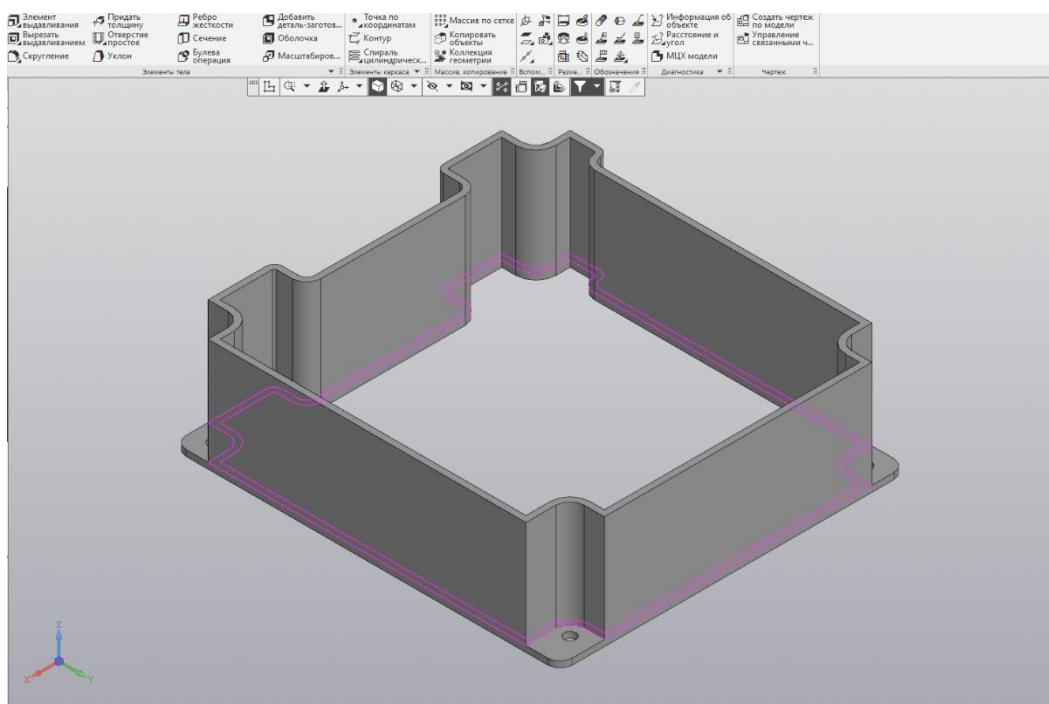


Рисунок 2.6 – Создание внешних стенок первого корпуса

3) Создание двух «эскизов» отверстий под кабели и «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.7);

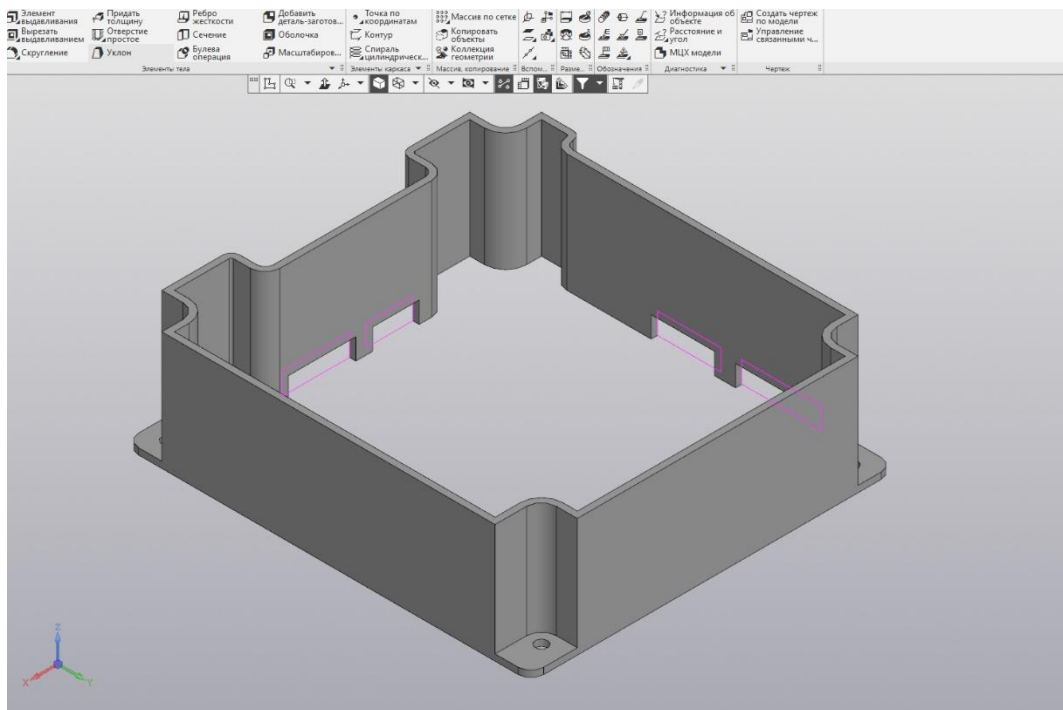


Рисунок 2.7 – Создание отверстий под кабели первого корпуса

4) Создание «эскиза» верхней части корпуса и «выдавливание» по оси z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.8);

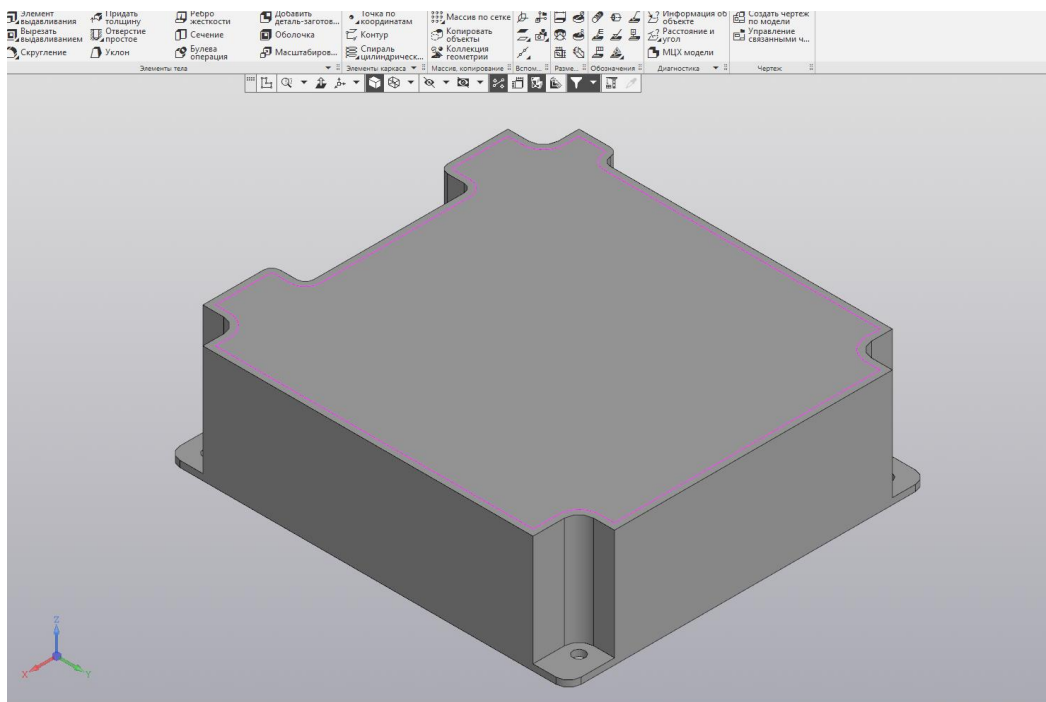


Рисунок 2.8 – Создание верхней части первого корпуса

5) Создание «эскиза» отверстий для креплений, отверстия под кабели для платы фото-резисторов и фото-диодов, последующее «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.9);

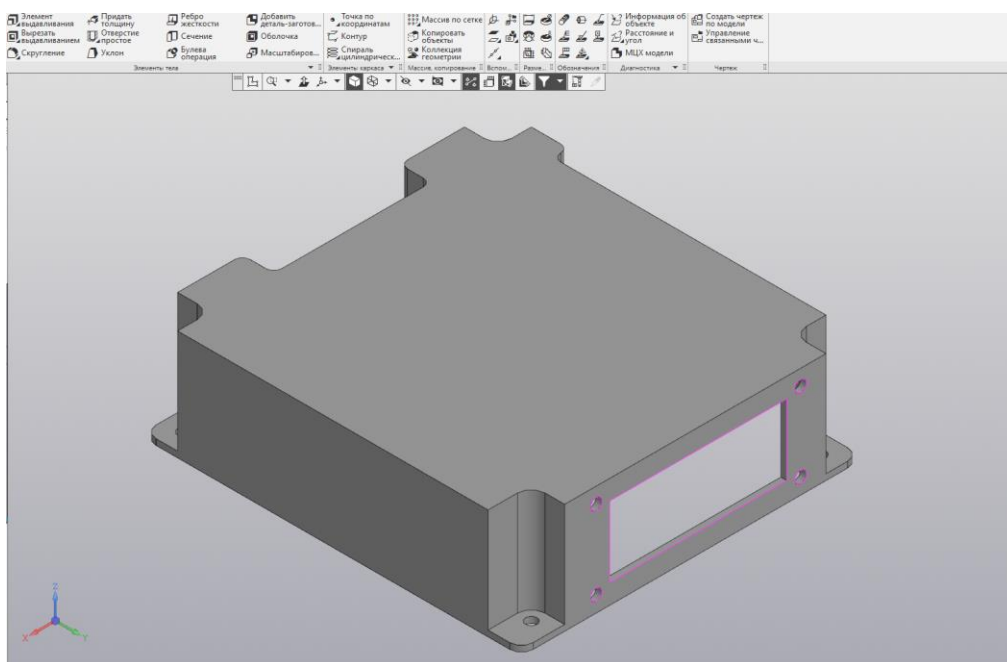


Рисунок 2.9 – Создание отверстия под вторую плату у первого корпуса

Этапы проектирования 3Д модели второго корпуса:

1) Создание «эскиза» основания, с учетом сквозных отверстий под стойки и «выдавливание» его по оси z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.10);

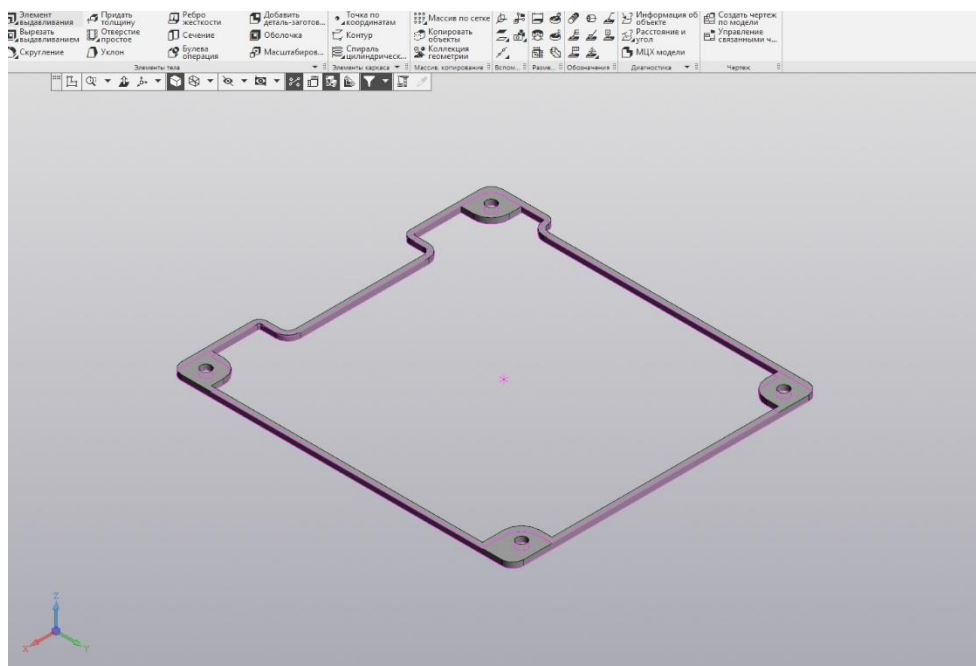


Рисунок 2.10 – Создание нижнего основание корпуса второго корпуса

2) Создание «эскиза» стенок толщиной 1,5 мм и «выдавливание» по оси Z на расстояние 26,5 мм (рисунок 2.11);

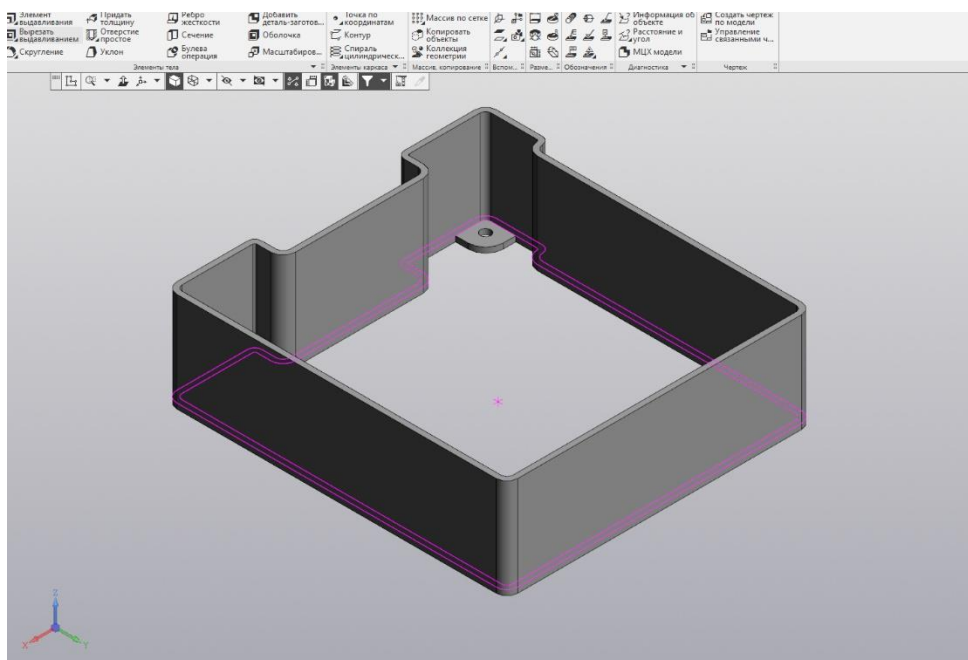


Рисунок 2.11 – Создание внешних стенок второго корпуса

3) Создание двух «эскизов» отверстий под кабели и «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.12);

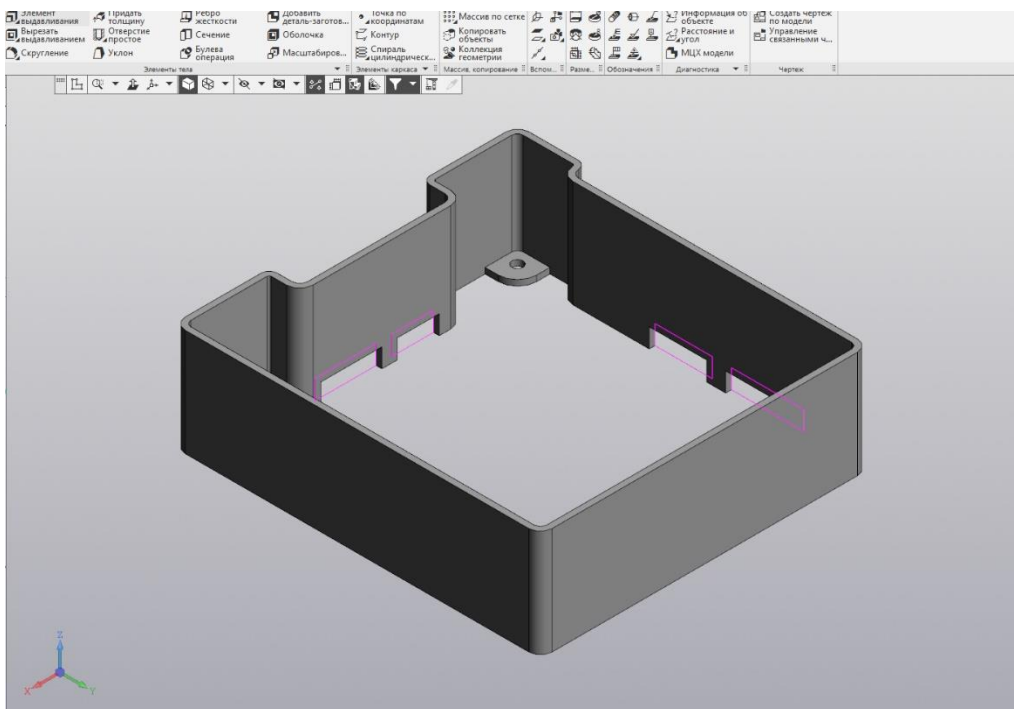


Рисунок 2.12 – Создание отверстий под кабели второго корпуса

4) Создание «эскиза» верхней части корпуса с учетом сквозных отверстий под стойки и «выдавливание» по оси Z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.13);

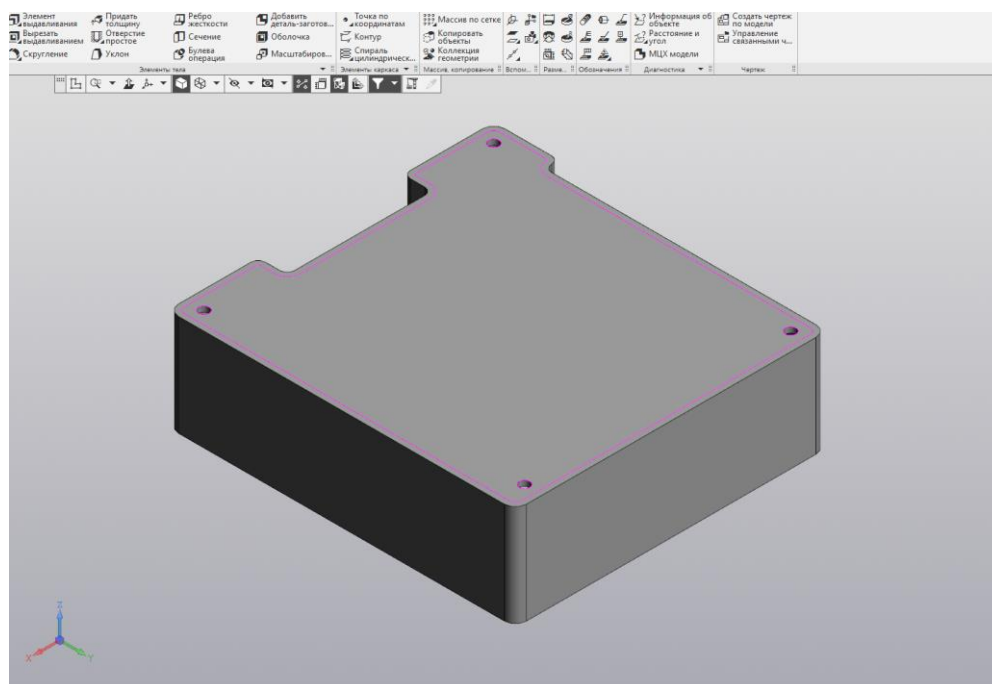


Рисунок 2.13 – Создание верхней части второго корпуса

5) Создание «эскиза» отверстий для креплений, отверстия под кабели для платы фото-резисторов и фото-диодов, последующее «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.14);

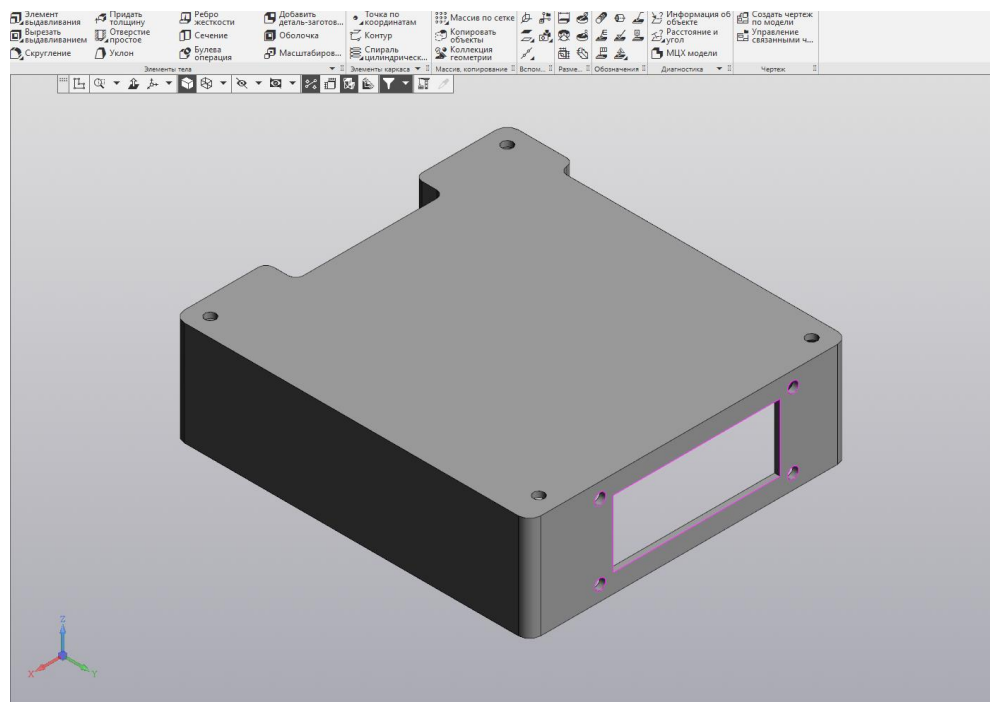


Рисунок 2.14 – Создание отверстия под вторую плату у второго корпуса

Этапы проектирования 3Д модели третьего корпуса:

- 1) Создание «эскиза» основания, с учетом сквозных отверстий под стойки и «выдавливание» его по оси z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.15);

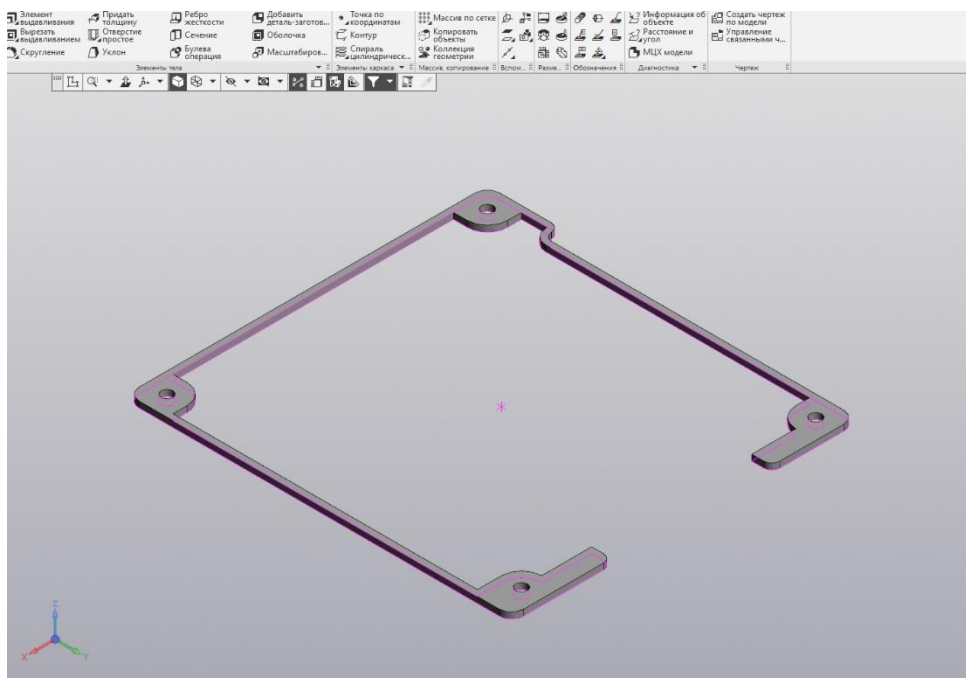


Рисунок 2.15 – Создание нижнего основание корпуса третьего корпуса

- 2) Создание «эскиза» стенок толщиной 1,5 мм и «выдавливание» его по оси z на расстояние 28 мм (рисунок 2.16);

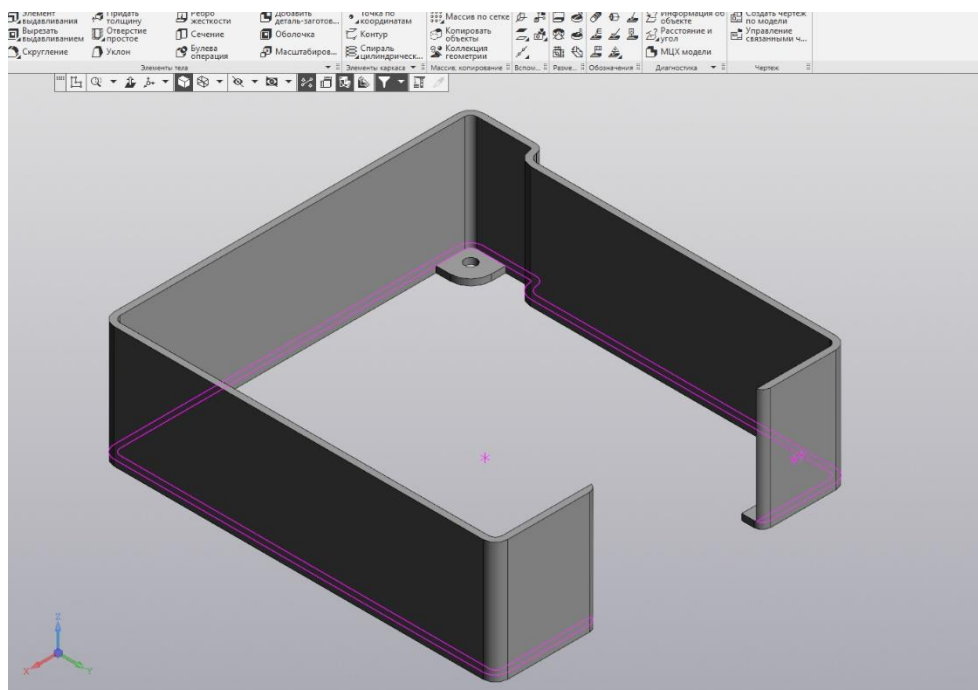


Рисунок 2.16 – Создание внешних стенок третьего корпуса

3) Создание «эскиза» отверстий под кабели и «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.17);

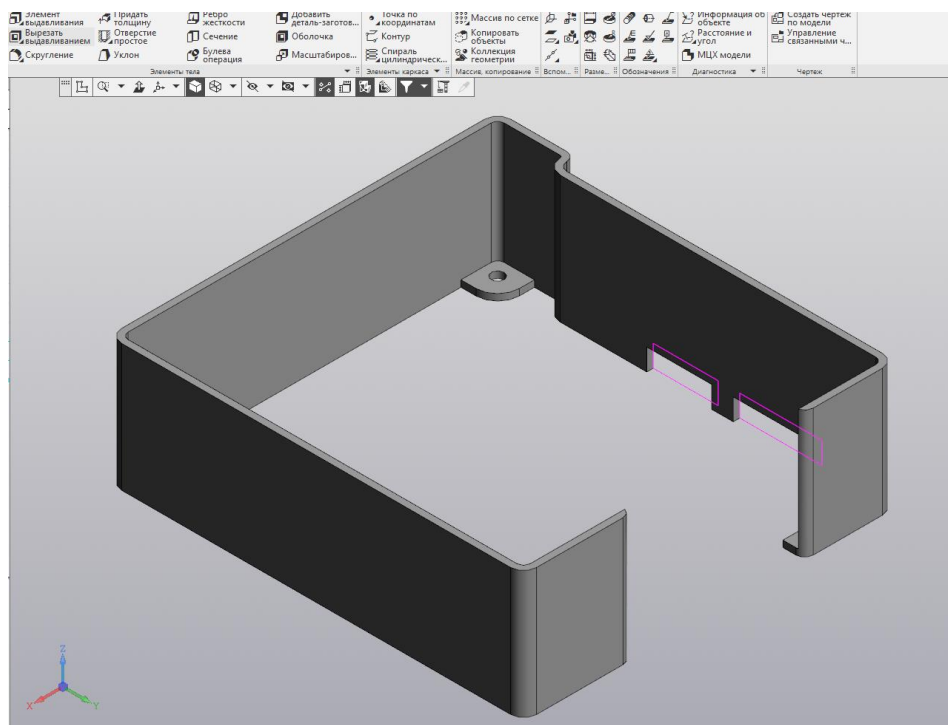


Рисунок 2.17 – Создание отверстий под кабели третьего корпуса

4) Создание «эскиза» верхней части корпуса и его «выдавливание» по оси z на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.18);

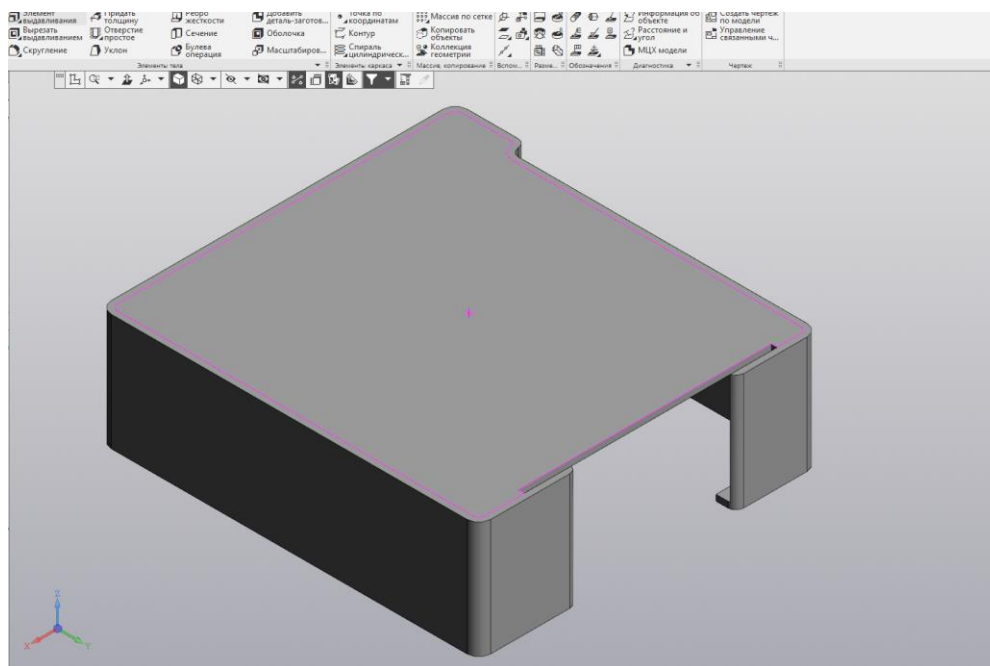


Рисунок 2.18 – Создание верхней части третьего корпуса

5) Создание «эскиза» отверстий для креплений, отверстия под кабели для платы фото-резисторов и фото-диодов, последующее «вырезание выдавливанием» на расстояние 1,5 мм (рисунок 2.19);

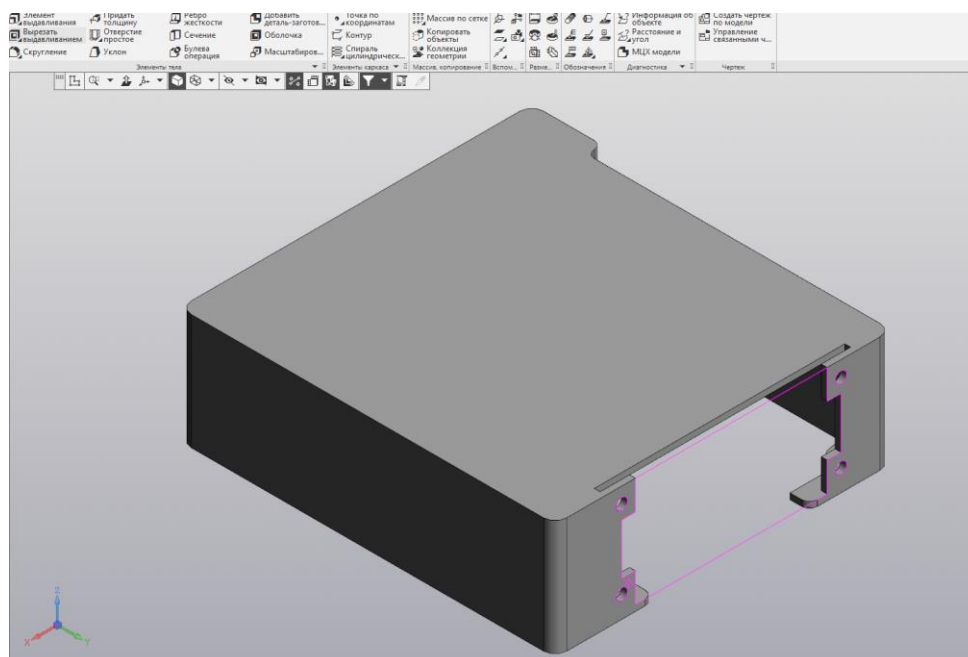


Рисунок 2.19 – Создание отверстия под вторую плату третьего корпуса

В качестве материала следует выбрать сплав алюминия, так как сплав на основе меди значительно увеличит массу корпуса, что недопустимо.

Алюминиевый сплав	Температура, К	Теплопроводность алюминиевого сплава, Вт/(м·град)
АВ	298...373...473...573	176...180...184...189
АД1 нагартованный	4...10...20...40...80...150...300	50...130...260...400...250...220...210
АД31 закаленный, состаренный	4...10...20...40...80...200...300...600	35...87...170...270...230...200...190...190
АД33	300...373...473...573	140...151...163...172
АД35	298...373...473...573	170...174...178...182
АК4	300...500...600...700	145...160...170...170
АК6 закаленный, состаренный	20...77...223...293...373...473...573...673	35...90...192...176...180...184...184...189
АК8 закаленный, состаренный	20...40...80...150...300...573...673	50...72...100...125...160...180...180
АЛ1	300...400...600	130...140...150
АЛ2	20...77...293	10...18...160
АЛ4	300...473...673	150...160...155
АЛ5	300...473...573	160...170...180
АЛ8	300...473...673	92...100...110
АМГ1	298...373...473...573...673	184...188...192...188...188
АМГ2	4...10...20...40...80...150...300...373...473...573...673	4,6...12...25...49...77...100...155...159...163...164...167
АМГ3	20...77...90...203...293	41...86...89...123...132
АМГ5 отожженный	10...20...40...80...150...300...473...673	10...20...40...66...92...130...130...150
АМГ6	20...77...173...293	13...43...75...92

Рисунок 2.20 – Значения теплопроводности алюминиевых сплавов [13]

Выбираем АМГ1, так как при температуре 373К (что сравнимо с наибольшей допустимой температурой наиболее тепловыделяемых элементов

ПН, рисунок 2.20) он имеет наилучшую теплопроводность. АМг1 представляет собой сплав на основе системы алюминий-магний, обладающий высокой устойчивостью к коррозии и хорошими пластическими свойствами. В составе 97,15-99,5% алюминия, 0,5-1,1% магния. Иные элементы – цинк, железо, кремний и другие. Цифра «1» дает информацию о проценте основного легирующего элемента. Сплав АМг1 при нормальных условиях ($t=20^{\circ}\text{C}$) имеет плотность 2690 кг/м³.

Во меню «приложения» нажимаем на кнопку «материалы». В справочнике переходим во вкладку: «Металлы и сплавы\Металлы цветные\Алюминий и сплавы алюминиевые\Сплавы алюминиевые деформируемые» и выбираем АМг1 ГОСТ 4784-97, нажимаем кнопку «выбрать» (рисунок 2.21).

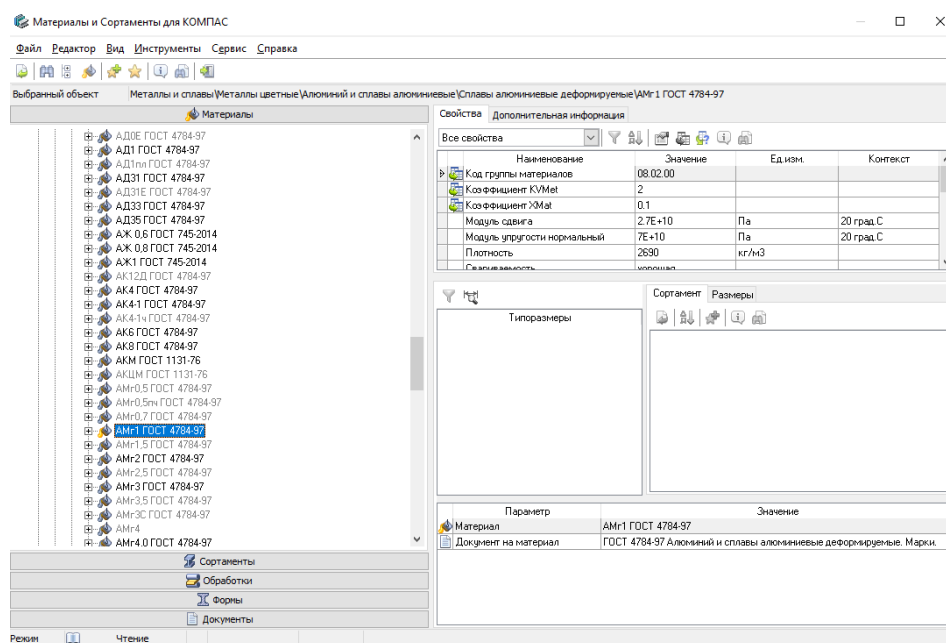


Рисунок 2.21 – Окно выбора материала

Сравним массы трех корпусов с учетом материала, используя возможности КОМПАС-3Д. Для этого в разделе диагностика нажимаем кнопку «МЦХ модели» (рисунок 2.22). Результаты вычислений МЦХ всех трех вариантов корпуса представлены в таблице 1.

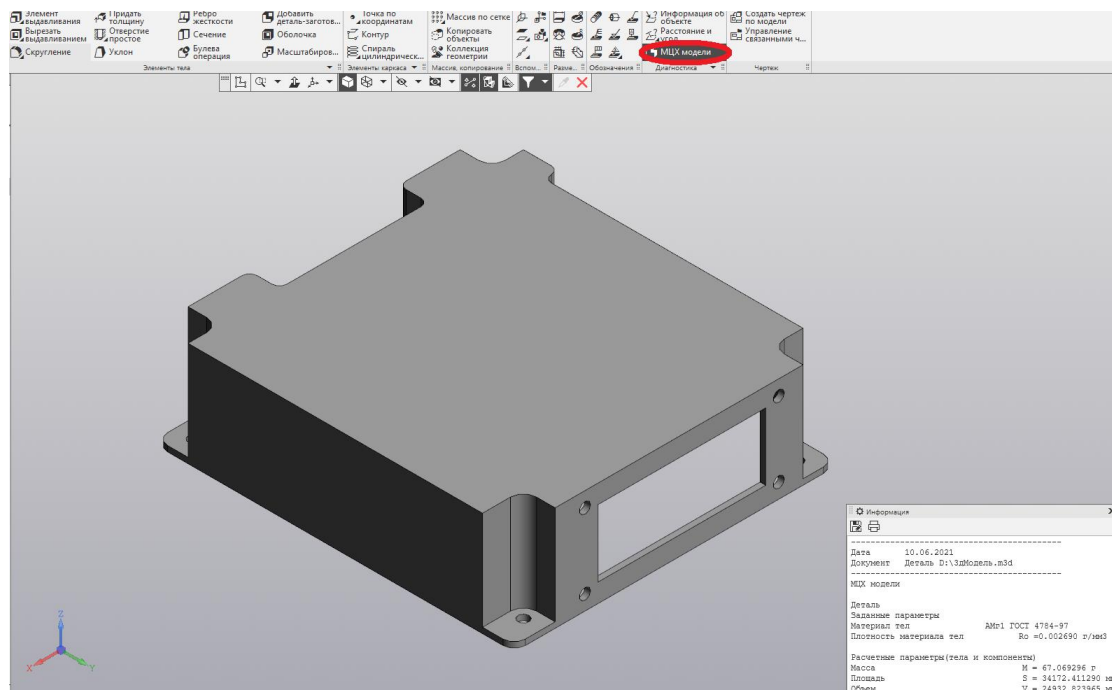


Рисунок 2.22 – Значения МЦХ первого корпуса

Таблица 1 – Значения МЦХ

	Первый вариант	Второй вариант	Третий вариант
Масса, г	67,069	68,480	69,014
Площадь, мм ²	34172,411	34919,097	35042,982
Объем, мм ³	24932,824	25457,187	25655,830

2.2 Моделирование теплового поля методом тепловых балансов

В общем случае тепловое поле нано- и микроспутников является трехмерным неоднородным и изменяющимся во времени, то есть нестационарным. На тепловые процессы, возникающие в аппарате, влияет множество факторов, а если учесть сложность конструкции КА, то становится очевидным, что аналитические методы для решения задачи моделирования теплового поля имеют ряд проблем. Для того, чтобы решить задачу моделирования был модифицирован метод конечных элементов, в следствие чего был разработан метод тепловых элементарных балансов (МЭБ), который в свою очередь к данному моменту времени уже успел себя зарекомендовать.

Суть этого метода описана в пункте 1.3.1 данной работы (страница 28). Стоит отметить, что в малых параллелепипедах – элементарных объемах (ЭО)

могут находиться не только источники, но и стоки тепла. Сведение к разностной схеме – ключевое преимущество данного метода в то время, как остальные методы требуют решения дифференциальных уравнений.

Поэтому моделирование теплового поля ПН «Фотон-Амур 2.0» будет проводиться с использованием именно этого метода.

Математическая модель в таком случае имеет вид:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{ci} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^N q_{ij} T_j + q_{ci} T_{ci} + Q_i \right), \quad (2.1)$$

где T_i , $T_i(t + \Delta t)$ – температура i -го элементарного объёма (ЭО) в настоящий и последующий моменты времени;

c_i ($i = 1, \dots, M$) - теплоёмкость i -го ЭО;

q_{ij} - теплопроводимость между i -м и j -м ЭО ($j = 1, \dots, N$);

q_{ci} - теплопроводимость между i -м ЭО и окружающей средой;

T_{ci} - температура среды;

Q_i - мощность источника тепла; M - общее количество ЭО в модели;

N - количество ЭО, имеющих тепловой контакт с i -м ЭО;

Δt - шаг расчёта [14].

Под коэффициентом теплопроводимости q понимается величина суммарной тепловой проводимости, учитывающая теплообмен теплопроводностью, конвекцией и излучением:

$$q = q_T + q_K + q_{II}, \quad (2.2)$$

где q_T, q_K, q_{II} - коэффициенты теплопроводимости, учитывающие теплообмен соответственно теплопроводностью, конвекцией и излучением [14].

Для расчета коэффициентов теплопроводности входящих в выражение (2.2), в данной работе были использованы следующие формулы [14].

1. Коэффициент, учитывающий теплообмен теплопроводностью:

$$q_T = \frac{S}{\left(\frac{l}{\lambda}\right)}, \quad (2.3)$$

где S — площадь поверхности нормальная к тепловому потоку;

l — толщина элемента;

λ — коэффициент теплопроводности материала элемента.

2. Коэффициент, учитывающий теплообмен конвекцией:

$$q_K = \alpha_K S, \quad (2.4)$$

где α_K - коэффициент теплоотдачи; S - площадь поверхности теплоотдачи [14].

3. Коэффициент, учитывающий теплообмен излучением:

$$q_{II} = \alpha_{II} S, \quad (2.5)$$

где α_{II} - коэффициент; S - площадь поверхности теплоотдачи излучением [14].

В соотношениях (2.4), (2.5) коэффициенты α_K , α_{II} вычисляются в зависимости от законов теплообмена, определяющих режимы движения окружающей среды около элементарного объема [14].

Так, для вакуумированных и слабо газонаполненных датчиков, приборов и блоков приборов коэффициенты α_{II} определяются по формуле:

$$\alpha_{II} = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{II} [(T_1 + 273)^2 + (T_2 + 273)^2] + (T_1 + T_2 + 546)^2, \quad (2.6)$$

где $\varepsilon_{\Pi} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2)}$ - приведенная степень черноты поверхностей тел, между

которыми происходит теплообмен; $0 < \varepsilon_1, \varepsilon_2 < 1$ - степени черноты поверхностей тел; T_1, T_2 - температуры поверхностей тел в °С [14].

На рисунке 2.23 представлена управляющее вычислительное устройство ПН «Фотон-Амур 2.0» и его тепловая модель ПН. На тепловой модели отмечены элементы, имеющие существенное тепловыделение (P1, P2, ... P8) и крепления C1, C2, C3, C4. Данные об этих элементах приведены в таблице 1.

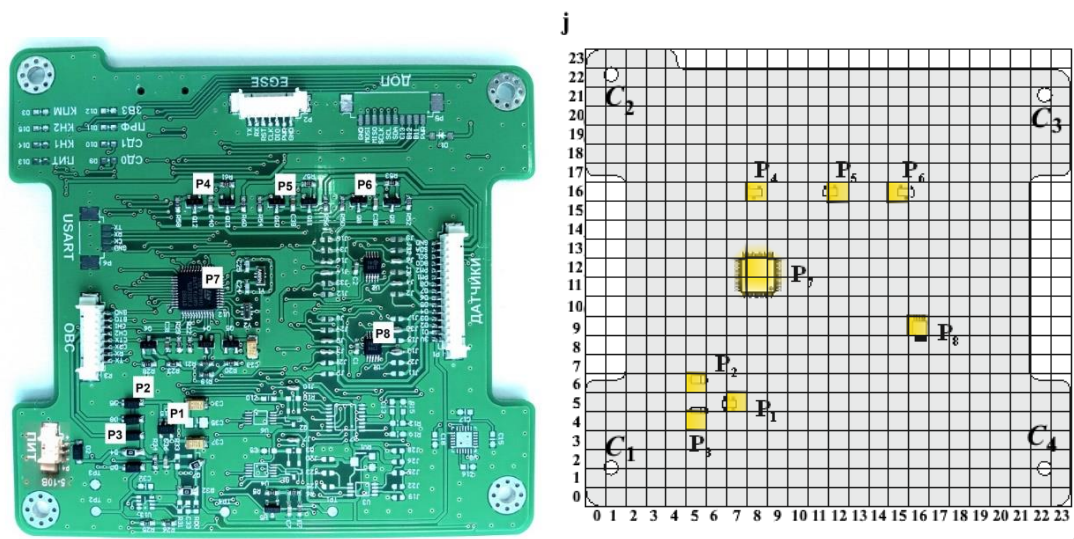


Рисунок 2.23 – Управляющее вычислительное устройство ПН «Фотон-Амур 2.0» и его тепловая модель ПН

Таблица 2 – Данные элементов с наиболее сильным тепловыделением

Обозначение	Наименование	Описание	Допустимая (рабочая) температура, °С
P1	LD3985	Линейный стабилизатор напряжения	-40 до +125
P2	SS0520	Диод Шоттки	-65 до +125
P3			
P4			
P5	MMBT3906	Транзистор кремниевый биполярный PNP	-65 до +150
P6			
P7	STM32F103C8T6	Микроконтроллер	-40 до +105
P8	ADS1118	Аналого-цифровой преобразователь	-40 до +125

С целью моделирования теплового поля ПН «Фотон-Амур 2.0», используя метод элементарных тепловых балансов было написано специальное программное обеспечение (ПО) «Foton-Amur 2.0» (рисунок 2.24).

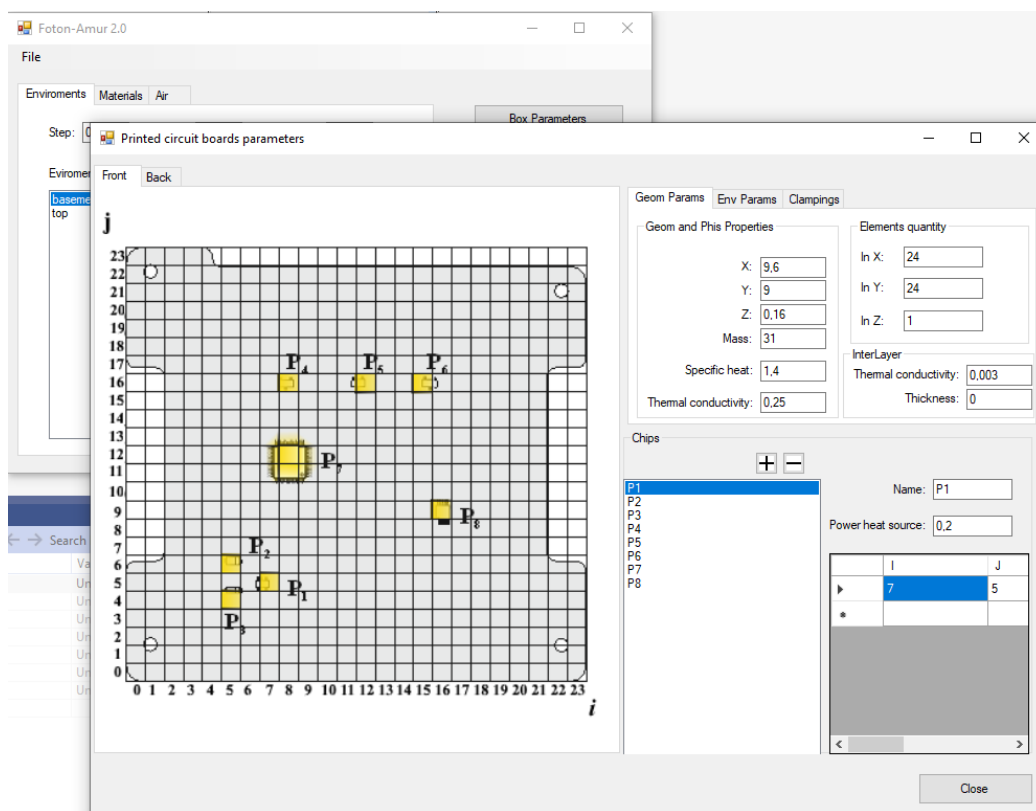


Рисунок 2.24 – Основное окно ПО «Foton-Amur 2.0»

Приложение «Foton-Amur 2.0» позволяет моделировать процессы теплообмена, подчиняющиеся сложным законам. Помимо этого, ПО позволяет представить результаты расчета тепловых процессов в каждой точке объекта с течением времени как динамически изменяемую визуализацию.

Для начала следует убедиться в корректности работы приложения «Foton-Amur 2.0». Чтобы это сделать, подключаем вычислительное устройство к источнику постоянного тока со входным напряжением равным 5В, устройство должно работать со средней мощностью, произведем снимок устройства ПН с помощью тепловизора Testo 875-li. Температуры наиболее тепловыделяемых электронных компонентов вычислительного устройства ПН «Фотон-Амур 2.0» приведены на рисунке 2.25. Условия окружающей среды были следующие: давление нормальное, температура окружающей среды составляла 30 °С.

После этого задаем аналогичные условия в программе «Foton-Amur 2.0» и производим расчет тепловых процессов. Полученные результаты приведены на рисунке 2.26.

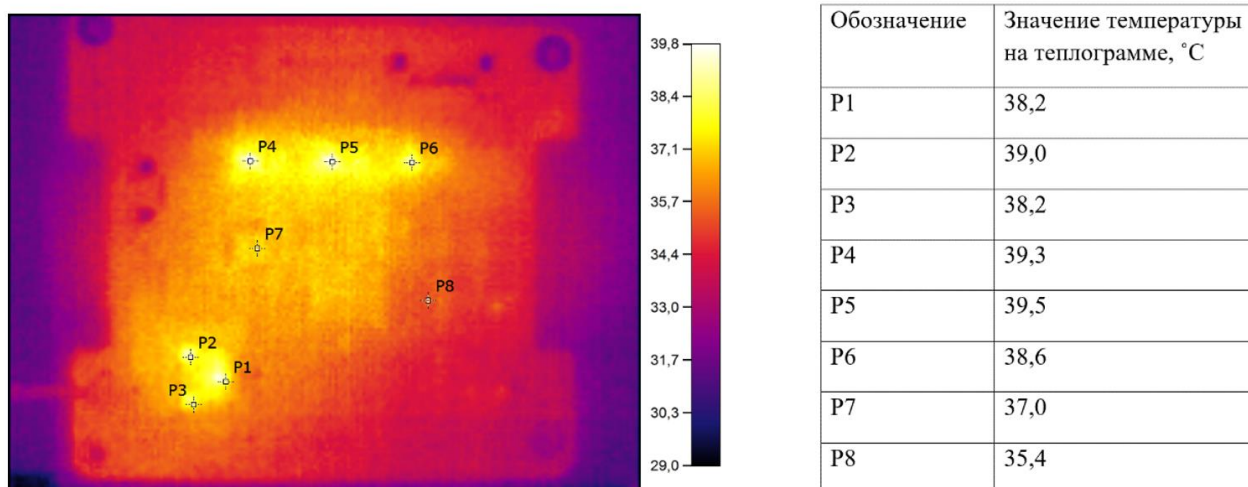


Рисунок 2.25 – Тепловое поле ПН полученное тепловизором

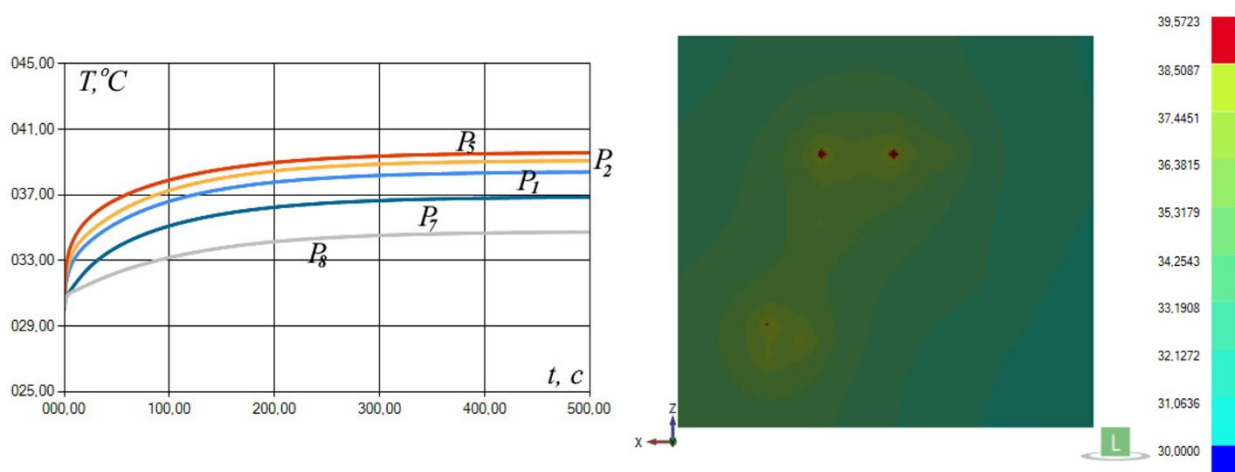


Рисунок 2.26 – Результат моделирования: тепловое поле ПН и графики изменения температуры в элементах P₁, P₂, P₅, P₇, P₈

Сравнивая результаты полученные тепловизором с результатами, полученными в разработанном ПО, можно сделать вывод ПО работает корректно, так как погрешность составила меньше 1%.

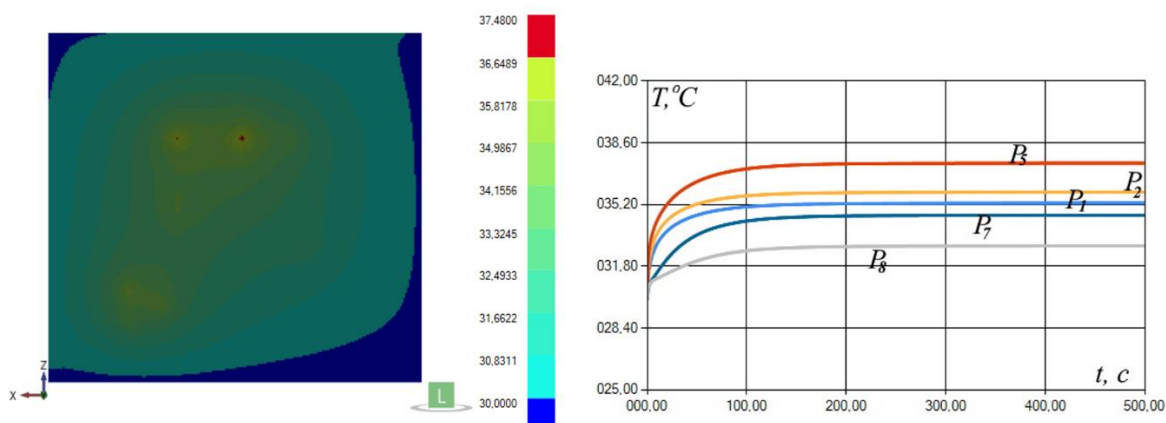


Рисунок 2.27 – Результат моделирования при установленном кожухе. Тепловое поле ПН и графики изменения температуры в элементах P_1, P_2, P_5, P_7, P_8

На следующем этапе было исследовано влияние кожуха на тепловое поле ПН. Результат моделирования теплового поля платы ПН с установленным кожухом и креплениями показан на рисунке 30. Предполагалось, что температура окружающей среды вокруг и внутри кожуха постоянная и равна 30°C . Окружающая среда – воздух, давление нормальное, дополнительный обдув отсутствует.

Как видно из рисунка 2.26 и рисунка 2.27, использование корпуса позволяет снизить максимальную температуру на плате на 2°C , время стабилизации температурного поля так же снизилось примерно с 300 с до 160 с. Это говорит о том, что корпус эффективно играет роль пассивного терморегулятора и его использование позволяет отвести от платы излишнее тепло без необходимости использования дополнительных систем терморегулирования.

На заключительном этапе исследовалось влияние на ПН «Фотон-Амур 2.0» гармонических тепловых воздействий. При этом принимались следующие условия моделирования: предполагалось, что внутри наноспутника с установленным ПН «Фотон-Амур 2.0» — вакуум, корпус наноспутника в определённой степени изолирует ПН «Фотон-Амур 2.0» от солнечного излучения и обеспечивает дополнительный нагрев управляющей платы ПН «Фотон-Амур 2.0» и его корпуса до 20°C . Внешний корпус наноспутника нагревается от -45 до $+80^{\circ}\text{C}$ по периодическому закону с периодом 96 мин, что приблизительно со-

ответствует движению наноспутника по орбите высотой 575 км. Предполагаем, что через крепления ПН «Фотон-Амур 2.0» к наноспутнику периодическое тепловое воздействие переходит на управляющую плату [1].

На рисунке 2.28 изображены графики изменения температуры в креплении C_1 и элементах P_1, P_5 и P_8 [1]. Как видно из рисунка 30, наличие корпуса позволяет поддерживать температуру на плате в пределах, комфортных для электронных компонентов. Так, минимальная температура на электронных компонентах не менее -30°C и не более $+103^{\circ}\text{C}$ в условиях вакуума внутри и вне ПН при гармоническом тепловом воздействии через крепления ПН к стойкам в наноспутнике.

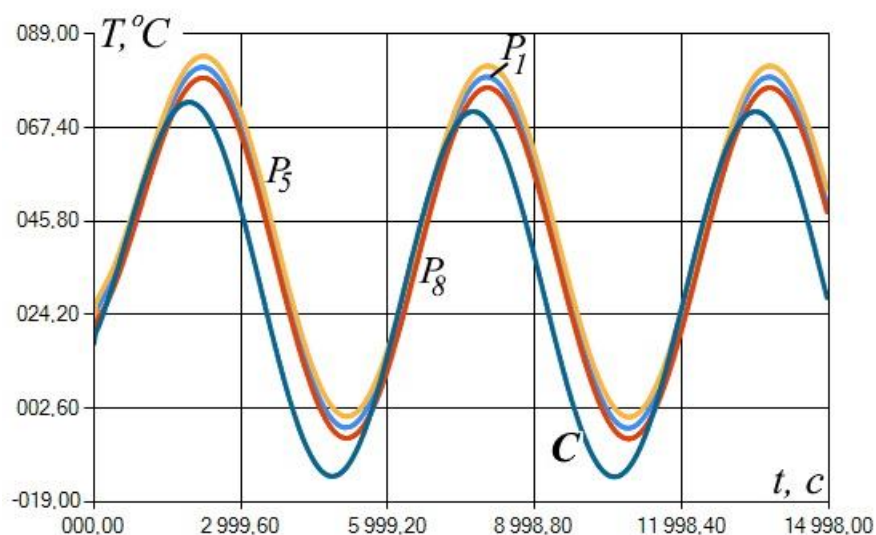


Рисунок 2.28 – Результат моделирования при установленном кожухе и гармоническом изменении температуры. Графики изменения температуры в элементах P_1, P_5, P_8 и креплении C (C_1)

2.3 Установка корпуса на плату ПН

Перед тем как установить корпус на нижнюю плату ПН, необходимо нанести теплопроводящее вещество на всю площадь соприкосновения основания корпуса и платы (рисунок 2.29). В качестве этого вещества была выбрана силиконовая термопаста GD900.

Термопаста GD900 предназначена для нанесения на процессоры ноутбуков, стационарных компьютеров, видеокарт, чипсетов как с активной, так и с

пассивной системой охлаждения. Так же успешно используется в других сферах, где есть необходимость в высокой тепловой проводимости. Для обеспечения лучшей теплопроводности, используется мельчайшие частицы оксидов металла, с целью заполнения пространства между процессором и радиатором происходило максимально плотно. Термопаста содержит 20% силиконовой жидкости и окись металла, паста стабильна при высоких температурах.

Характеристики

- Теплопроводность: 4.8 W/mK.
- Диапазон рабочих температур от -50 до +240 °С.

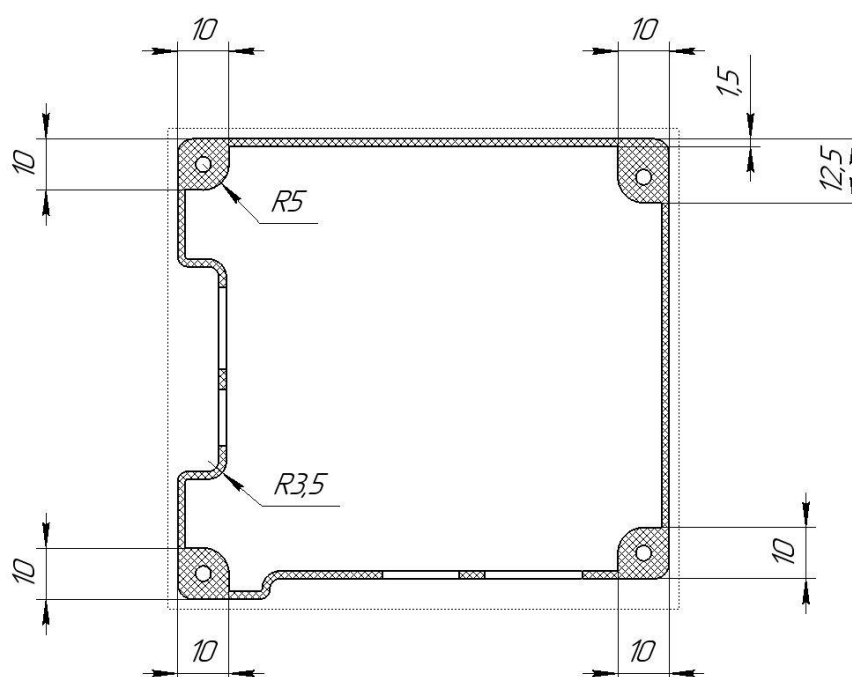


Рисунок 2.29 – Площадь соприкосновения основания корпуса с платой ПН

Соединение передней платы и корпуса обеспечивается четырьмя винтами с полукруглой головкой номинальным диаметром резьбы 3 мм, длиной 6 мм ГОСТ 17473-80 с внутренней стороны корпуса (рисунок 2.30). Снаружи устанавливаются шайбы ГОСТ 11371-78 и закручиваются шестигранные гайки номинальным диаметром резьбы высотой 2,4 мм ГОСТ 5915-70.

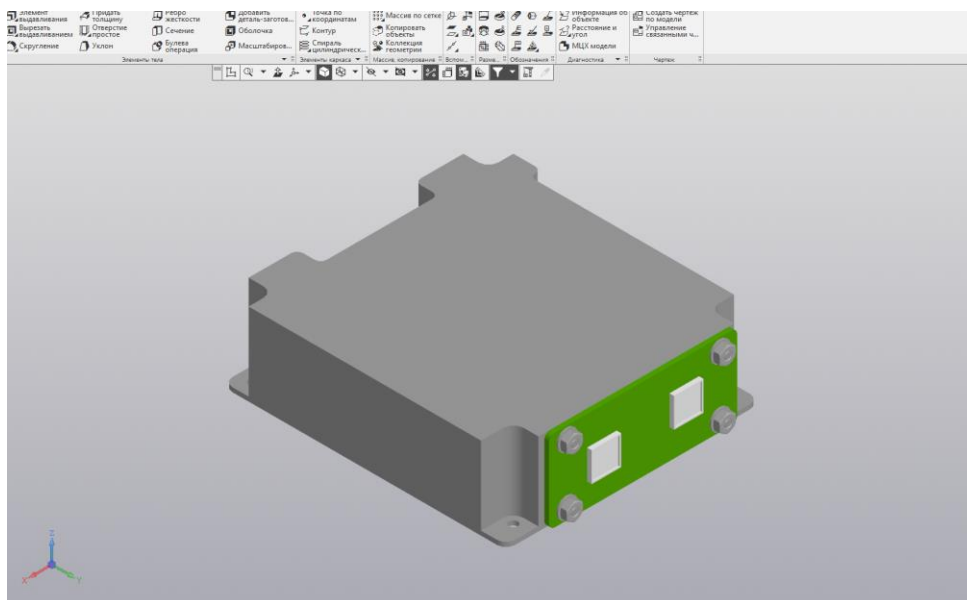


Рисунок 2.30 – Крепление передней платы

Крепление основания к нижней плате ПН осуществляется с помощью латунных стоек МЗ ГОСТ 20862-81(рисунок 2.31).

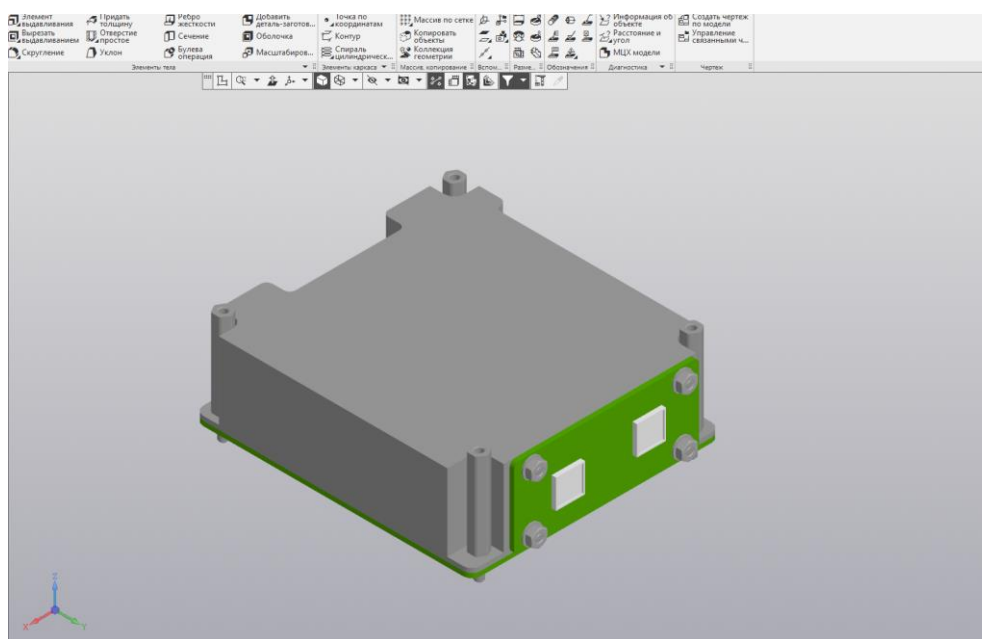


Рисунок 2.31 – Крепление нижней платы

2.4 Технологическая карта

Операционно-технологическая карта проведения работ по моделированию теплового поля ППН «Фотон-Амур» представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Проведение работ по моделированию теплового поля ПН

Общие технологические требования, требования техники безопасности при проведении работ	
Содержание перехода	Особые указания
1 Персонал, не ознакомившийся с техникой безопасности при работе с электрооборудованием, без прохождения соответствующего обучения, не прошедший аттестацию и не сдавший зачет, к работе не допускается.	
2 При работе с оборудованием нахождение посторонних лиц запрещено.	
3 До начала работ следует провести проверку и оценить знания инструкций по технике безопасности: - меры безопасности при эксплуатации электрооборудования; - меры пожарной безопасности.	
Порядок проведения работ по моделированию теплового поля ПН «Фотон-Амур 2.0»	
1 Получить техническое задание – смоделировать тепловое поле ПН «Фотон-Амур 2.0»	
2 Выбрать корпус из ряда уже спроектированных вариантов в качестве пассивной СТР, для ПН «Фотон-Амур 2.0»	Размеры ПН 90x96 мм
3 Подключить вычислительное устройство ПН к источнику постоянного тока.	Входное напряжение 5В. Устройство должно работать на средней мощности.
4 Измерить температуры наиболее тепловыделяющих элементов с помощью тепловизора.	Тепловизор Testo 875-1i. Температура окружающей среды постоянна и равна 30 °С
5 В разработанном ПО задать условия аналогичные условиям из пункта 4, провести расчеты.	
6 Сравнить результаты, полученные при помощи тепловизора и разработанного ПО.	Если погрешность составляет больше 1% следует убедиться, что алгоритмы ПО составлены верно, при нахождении ошибок в программе - исправить. Если результаты сходятся, то следует приступить к пункту 7
7 Провести моделирование теплового поля с учетом установленного корпуса при условиях, соответствующих пункту 4.	Проводится предварительная оценка эффективности корпуса.
8 Провести моделирование теплового поля с учетом установленного корпуса в условиях, имитирующих космическое пространство.	Внутри и снаружи наноспутника с установленным ПН «Фотон-Амур 2.0» вакуум, исполнение МКА является – негерметичным. Корпус наноспутника из алюминия частично изолирует вычислительное устройство от разного типа излучения. Спутник движется по орбите высотой 575 км.

Продолжение таблицы 3

9 Провести анализ эффективности корпуса по полученным данным о модуляции теплового поля ПН.	
10 По результатам анализа сформировать комплект документов: акт о проведенных испытаниях, рекомендации.	

3 РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО

После того, как было установлено, что корпус эффективно справляется с поставленной задачей терморегулирования, следует рассчитать затраты на разработку ПО; на проектирование и производство корпуса.

Важным фактором производства является себестоимость изготовления. Себестоимость – это совокупность затрат на материалы, готовые изделия и заработной платы работникам производства.

Расчет себестоимости будем находить, используя как известные виды затрат (материалы, покупные изделия), так и опираясь на прогнозируемые реально существующие затраты.

Расчет будем производить формуле:

$$C = M + П + L_0 + L_D + L_{CH} + P_K, \quad (3.1)$$

где M – затраты на материалы;

$П$ – затраты на покупные изделия;

L_0 – основная заработная плата;

L_D – доп. заработная плата;

L_{CH} – отчисления на соц. нужды;

P_K – косвенные расходы.

Затраты на основные материалы, изготовление корпуса и покупные изделия показаны в таблице 4. Корпус изготавливается с помощью станков ЧПУ, средняя стоимость изготовления детали подобных размеров вместе с затратами на материал составляет 8000 рублей.

Таблица 4 – Затраты на изделия и материалы

Изделие	Цена за штуку, руб.	Количество, шт.	Сумма, руб.
Термопаста GD900	180	1	180

Продолжение таблицы 4

Винт М3х6 ГОСТ 17473-80	4	4	16
Гайка М3 ГОСТ 5915-62	3	4	12
«Компас-3D» v19 Учебная версия	0	1	0
Шайба М3 ГОСТ 11371-78	3	4	12
Стоимость корпуса	8000	1	8000
Итоговая стоимость	8220		

Так как проектирование корпуса для ПН относится ракетно-космической отрасли, то специалист должен быть компетентен в данной сфере. Поэтому предполагается, что для проектирования корпуса ПН понадобится инженер ракетно-космической отрасли, работа которого составит 24 часа. Для разработки программного обеспечения потребуется программист, трудоемкость его работы составит 48 часов.

Чтобы провести расчет заработной платы воспользуемся следующей формулой:

$$L_0 = 1,15 \cdot t_{изд} \cdot e, \quad (3.2)$$

где 1,15 - коэффициент, который учитывает премии;

$t_{изд}$ - трудоемкость изготовления изделия;

e - тарифная ставка за час работы.

Часовая тарифная ставка инженера ракетно-космической отрасли составляет 370 руб. В следствие получаем, что заработная плата составляет:

$$L_{01} = 1,15 \cdot 24 \cdot 370 = 10212 \text{ рублей}$$

Программист имеет часовую тарифную ставку 300 рублей. Произведем расчет его заработной платы:

$$L_{02} = 1,15 \cdot 48 \cdot 300 = 16560 \text{ рублей}$$

Учтем дополнительную заработную плату рабочим, что составляет 8 % от основной заработной платы.

В данном случае дополнительная заработная плата инженера ракетно-космической отрасли составляет:

$$L_{Д1} = 0,08 \cdot L_{01} = 816,96 \text{ рублей} . \quad (3.3)$$

Дополнительная заработная плата программиста составляет:

$$L_{Д2} = 0,08 \cdot L_{02} = 1324,8 \text{ рублей} . \quad (3.4)$$

Так же следует учесть отчисления на социальное страхование работников, которое составляет 14% от суммарной заработной платы.

Отчисления на социальные нужды инженеру ракетно-космической отрасли составляют:

$$L_{СН1} = (L_{Д1} + L_{01}) \cdot 0,14 = 1544,05 \text{ рублей} . \quad (3.5)$$

Отчисления на социальные нужды программисту составляют:

$$L_{СН2} = (L_{Д2} + L_{02}) \cdot 0,14 = 2503,87 \text{ рублей} . \quad (3.6)$$

В ракетно-космической отрасли, как правило, косвенные расходы составляют 8-10% от суммарных расходов на производство:

$$P_K = 0,1 \cdot (M + П + L_{01} + L_{Д1} + L_{СН1} + L_{02} + L_{Д2} + L_{СН2}) = 4118,17 \text{ рублей} . \quad (3.7)$$

После нахождения всех слагаемых, подставляем полученные значения в формулу нахождения себестоимости изготовления:

$$C = M + П + L_{01} + L_{д1} + L_{CH1} + L_{02} + L_{д2} + L_{CH2} + P_K = 41181,68 \text{ рублей} . \quad (3.8)$$

В данной главе был произведен экономический расчет себестоимости проектирования и изготовления корпуса для полезной нагрузки, разработки программного обеспечения с целью моделирования теплового поля ППН «Фотон-Амур 2.0».

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Поскольку ПН «Фотон-Амур 2.0», рассматриваемая в данной выпускной квалификационной работе, относится к электронным устройствам, то при работе следует учитывать меры электробезопасности.

4.1 Основные понятия электробезопасности

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [14].

Электроустановка – совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии [15].

Персонал электротехнический – административно-технический, оперативный, оперативно-ремонтный, ремонтный персонал, организующий и осуществляющий монтаж, наладку, техническое обслуживание, ремонт, управление режимом работы электроустановок [15].

Персонал электротехнологический – персонал, у которого в управляемом им технологическом процессе основной составляющей является электрическая энергия (например, электросварка, электродуговые печи, электролиз и пр.), использующий в работе ручные электрические машины, переносной электроинструмент и светильники, и другие работники, для которых должностной (производственной) инструкцией или инструкцией по охране труда установлено знание правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (где требуется II или более высокая группа по электробезопасности) [15].

4.2 Меры безопасности обслуживающего персонала и посторонних

лиц

Безопасность обслуживающего персонала и посторонних лиц должна обеспечиваться выполнением следующих мероприятий:

- соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путем закрытия, ограждения токоведущих частей;
- применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
- применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
- использование средств защиты и приспособлений, в том числе для защиты от воздействия электрического и магнитного полей в электроустановках, в которых их напряженность превышает допустимые нормы [15].

4.3 Специфика поражающего действия электротока

Электрический ток, поражая живую ткань человека, может наносить разностороннее действие, так как электрический ток наносит электролитическое, термическое, биологическое и механическое воздействие.

Термическое действие электротока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве до высокой температуры кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути тока, что вызывает в них серьезные функциональные расстройства [15].

Электролитическое действие тока выражается в разложении органической жидкости, в том числе крови, что сопровождается значительными нарушениями их физико-химического состава [15].

Механическое (динамическое) действие электротока выражается в расслоении, разрыве и других подобных повреждениях различных тканей организма, в том числе мышечной ткани, стенок кровеносных сосудов, сосудов легочной ткани и др., в результате электродинамического эффекта, а также мгно-

венного взрывоподобного образования пара от перегретой током тканевой жидкости и крови [15].

Биологическое действие электрического тока проявляется и раздражении, и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биоэлектрических процессов, протекающих в нормально действующем организме и теснейшим образом связанных с его жизненными функциями [15].

Электротравма – травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги. Указанное многообразие действия электрического тока на организм нередко приводит к различным электротравмам, которые сводятся к двум видам:

- Местное повреждение или по-другому местная электротравма;
- Общие электротравмы, так называемым электрическим ударам, когда поражается весь организм из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем [15].

Местная электротравма – это крайне выраженное локальное нарушение целостности человеческих тканей, которое может быть вызвано под воздействием электрического тока или электрической дуги [15].

Характерные местные электротравмы – электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия [15].

Электрический ожог подразделяют на токовый (контактный) и дуговой [15].

Электрические знаки, именуемые также знаками тока или электрическими метками, представляют собой резко очерченные пятна серого или бледно-желтого цвета на поверхности тела человека, подвергшегося действию электрического тока [15].

Металлизация кожи – проникновение в верхние слои кожи мельчайших частичек металла, расплавившегося под действием электрической дуги [15].

Механические повреждения являются в большинстве случаев следствием резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока,

проходящего через тело человека. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани, вывихи суставов. Разумеется, что электротравмами не считаются травмы, вызванные падением с высоты, ушибами о предметы и т.п. в результате воздействия тока [15].

Электрический удар – возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, проявляющееся в непроизвольных судорожных сокращениях различных мышц тела [15].

Исход воздействия электротока на организм человека зависит от ряда факторов, в том числе от значения и длительности прохождения тока через тело, рода и частоты тока, а также от индивидуальных свойств человека [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы на основе статей российских и зарубежных авторов был проведен литературный обзор о способах и методах терморегулирования КА, была проанализирована структура математического расчета тепловых процессов КА, был проведен анализ САПР, имеющихся в Амурском государственном университете для решения поставленной задачи, итогом выбора САПР стал «КОМПАС-3D», были спроектированы несколько вариантов корпуса из алюминия в качестве пассивной терморегулирующей системы для ПН «Фотон-Амур 2.0», было разработано специализированное программное обеспечение на основе МЭБ, с помощью которого было смоделировано тепловое поле ПН «Фотон-Амур 2.0» в условиях космического пространства. Процесс моделирования подробно описан в технологической карте. Дополнительно был проведен расчет себестоимости проектирования и изготовления корпуса, а также определены меры техники безопасности.

По результатам проведенной работы были сформулированы следующие выводы:

- 1) Был спроектирован корпус для ПН «Фотон-Амур 2.0» предназначенный для теплоотведения;
- 2) Проведено моделирование теплового поля ПН с использованием разработанного ПО «Foton-Amur 2.0»;
- 3) Проведен анализ результатов проведенного моделирования, которые установили, что предложенная конструкция корпуса из АМг1 для ПН «Фотон-Амур 2.0» является достаточно эффективным с тепловой точки зрения. В данном случае корпус играет роль пассивной системы терморегулирования и позволяет поддерживать температуру от -15°C до $+85^{\circ}\text{C}$, комфортную для используемых на управляющей плате ПН электронных компонентов. При этом учитывались условия нахождения ПН в вакууме внутри и вне корпуса, и, при наличии тепловых воздействий на управляющую плату от наноспутника через крепления платы к стойкам внутри наноспутника. Очевидно, что эффектив-

ность такой пассивной системы терморегуляции в значительной степени зависит от материала корпуса и винтов, соединяющих плату и стойки.

ПРИМЕЧАНИЕ

Автор выражает глубокую признательность и благодарность главному научному сотруднику Саратовского института проблем точной механики и управления РАН доктору физико-математических наук Барулиной Марине Александровне, а также ведущему научному сотруднику кандидату технических наук Голикову Алексею Викторовичу за помощь в осуществлении работ по моделированию теплового поля.

Данная выпускная работа проходила апробацию:

Конференция «День науки-2021» Амурского государственного университета (диплом за второе место).

Публикации:

Трехмерные неоднородные тепловые поля полезной нагрузки, разработанной для наноспутников, «Фотон-Амур»/ Фомин Д.В., Барулина М.А., Голиков А.В., Струков Д.О., Герман А.С., Огородников А.А./ Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Т 20-2, 2021, С 101-110.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование трёхмерных неоднородных тепловых полей электронных плат наноспутников / М. А. Барулина, А. В. Голиков, Д. В. Фомин, Д. О. Струков // Электронные информационные системы. – 2018. – № 2(17). – С. 22-30.
2. CubeSat Design Specification (1U – 12U) REV 14 CP-CDS-R14. Cal Poly – San Luis Obispo, CA. [Электронный ресурс]. – 2020 – Режим доступа: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/5f24997b6deea10cc52bb016/1596234122437/CDS+REV14+2020-07-31+DRAFT.pdf>. – 05.03.2021.
3. Голиковская, К.Ф. Оптимизация работы и динамический анализ системы терморегулирования космического аппарата : автореф. дис.... Канд. Юрид. Наук: 05.07.02 / Голиковская К.Ф. – Красноярск. 2003. – 174 с.
4. Ю. В. Голобурда, Н.С. Конева: Моделирование и тепловой анализ конструкции спутника CubeVel // XVI конференция молодых учёных Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года : сб. тр. / Под редакцией А.М. Садовского – Москва, 2019. – С. 11-18.
5. Цаплин, С.В. Теплообмен в космосе / С. В. Цаплин, С.А. Болычев, А.Е. Романов – Самара : Издательство Самарский университет. 2013. – 56 с.
6. Финченко В.С., Котляров Е.Ю., Иванов А.А. Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций // под ред. д.т.н., проф. В.В. Ефанова, д.т.н. В.С. Финченко В.С. – Химки. Издатель АО «НПО Лавочкина», 2018. – 400с.
7. Борщев, Н. О. Алгоритм параметрического определения теплофизических характеристик покрытий / Н. О. Борщев, А. Е. Сорокин, А. Е. Белявский // СТИН. – 2019. – № 9. – С. 34-37.
8. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат. [Электронный ресурс]. – 1959 – Режим доступа: <https://mashxxl.info/page/092058126207104114148210047124233161144254090188/>. – 12.03.2021.

9. Перспективы применения вакуумной техники и технологии в космической отрасли / В. А. Романько, С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров [и др.] // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21. – № 1. – С. 49-56.
10. Официальный сайт ERSTE VAK Ltd.: поставки и монтаж вакуумного и термического оборудования для промышленных предприятий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://erstvak.com/catalog/vakuumnaya-sistema-ustanovka/imitator-kosmosa/>. – 24.03.2021.
11. КОМПАС-3D v19. Инструмент создателя — [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://kompas.ru/>. – 25.04.2021.
12. SolidWorks – стандарт трехмерного проектирования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/6733#:~:text=Базовое%20решение%20SolidWorks%20-%20это%20система,в%20соответствии%20с%20требованиями%20ЕСКД.> – 25.04.2021.
13. Теплопроводность алюминиевых сплавов. [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://metromet.ru/novosti/tep-alyuminiy/>. – 12.05.2021.
14. Температурные поля элементов наноспутников / М. А. Барулина, Д. В. Фомин, А. В. Голиков [и др.] // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 11-2. – С. 39-46.
15. Корж, В.А. Охрана труда : учебное пособие / Корж В.А., Фролов А.В., Шевченко А.С. под ред. — Москва : КноРус, 2016. — 424 с. — ISBN 978-5-406-04188-8. [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://book.ru/book/917221>. – 10.06.2021.