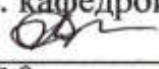


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)


Факультет инженерно-физический  
Кафедра физики  
Направление подготовки 03.03.02 – Физика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
 Е.В. Стукова  
«26» июня 2023 г.

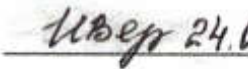
**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Моделирование процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции средствами пакета COMSOL MultiPhysics

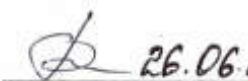
Исполнитель  
студент группы 911-об

 23.06.2023 Д.Л. Ворона  
(подпись, дата)

Руководитель  
доцент, канд. физ.-мат. наук

 24.06.2023 И.В. Верхотурова  
(подпись, дата)

Нормоконтроль  
доцент, канд. физ.-мат. наук

 26.06.2023 О.В. Зотова  
(подпись, дата)

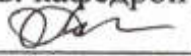
Благовещенск 2023

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова  
«20» апреля 2023 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Ворона Дианы Леонидовны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Моделирование процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции средствами пакета COMSOL MultiPhysics (утверждена приказом от 20.04.23 №951-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 23.06.2023

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: пакет прикладных программ COMSOL MultiPhysics, материалы с заданными терморadiационными характеристиками для экранно-вакуумной теплоизоляции, содержащиеся в библиотеке материалов программы COMSOL MultiPhysics

4. Содержание выпускной квалификационной работе (перечень подлежащих разработке вопросов): разработать модель процесса теплопередачи в экранно-вакуумной тепловой изоляции космического аппарата средствами пакета COMSOL MultiPhysics; схема ЭВТИ должна быть приближена к реальной; в модели должен быть учтен внешний тепловой источник, воздействующий на внешнюю поверхность теплоизоляции; вычислить коэффициент удельного термического сопротивления и результирующий тепловой поток через ЭВТИ; провести сравнение полученных из модели результатов с экспериментальными данными

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): нет

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): нет

7. Дата выдачи задания 20.04.2023

Руководитель выпускной квалификационной работы: Верхотурова Ирина Владимировна, доцент, канд. физ.- мат. наук, доцент

Задание принял к исполнению (дата): 20.04.2023

  
\_\_\_\_\_  
(подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 50 с., 23 рисунка, 3 таблицы и 20 источников.

### КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ, ЭКРАННО-ВАКУУМНАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ТЕРМОРАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Вопрос о разработки способов поддержания заданного теплового режима космического аппарата (КА) до сих пор является актуальным. Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) одно из эффективных средств терморегуляция КА. Материалы, используемые в ЭВТИ, должны обладать определенными терморadiaционными характеристиками, прямое измерение которых не всегда возможно (особенно для ЭВТИ сложного состава). Использование средств компьютерного моделирования позволяет определять необходимые теплофизические характеристики для расчета параметров эффективности ЭВТИ и предварительной оценки ее работоспособности.

Цель работы – разработка модели процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции при наличии внешнего теплового источника с помощью средств COMSOL MultiPhysics.

В данной работе разработана модель процесса теплопередачи в ЭВТИ при наличии внешнего теплового источника, воздействующего на внешнюю поверхность теплоизоляции. Схема ЭВТИ при моделировании приближена к реальной и состоит из внешнего облицовочного слоя и экранов ЭВТИ, разделенных прокладочным материалом. Используя, полученное из модели значение температуры первого экрана ЭВТИ вычислены коэффициент удельного термического сопротивления и результирующий тепловой поток через ЭВТИ. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Литературный обзор	8
1.1 Тепловой режим работы космического аппарата	8
1.2 Основные понятия теплообмена космического аппарата	9
1.3 Параметры эффективности экранно-вакуумной теплоизоляции	12
1.4 Математические модели теплообмена в многослойной конструкции экранно-вакуумной теплоизоляции	14
2 Объекты и методы исследования	23
2.1 Экранно-вакуумная теплоизоляция	23
2.2 Пакет прикладных программ COMSOL MultiPhysics	27
2.3 Сравнение программного обеспечения для моделирования тепловых процессов	31
3 Моделирование процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции	33
3.1 Настройка моделей и условий	33
3.2 Результаты моделирования процесса теплопередачи в исследуемых моделях	41
Заключение	45
Библиографический список	47

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о поддержании заданного теплового режима КА до сих пор является важным аспектом при построении КА. Терморегуляция осуществляется с помощью различных подсистем теплозащиты, входящих в систему обеспечения теплового режима КА. Среди систем пассивного терморегулирования внешней поверхности корпуса КА с учетом тепловой защиты от солнечной радиации широко используется достаточно эффективное средство экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) [1].

ЭВТИ – эффективное средство пассивного терморегулирования космического аппарата, при воздействии на его поверхность внешнего теплового источника. Марки ЭВТИ различаются широким спектром сочетания материалов, используемых в качестве слоев мата ЭВТИ, облицовочных и разделительных слоев [1]. При этом данные материалы должны обладать рядом определенных теплофизических и радиационных характеристик, необходимых для расчета параметров, определяющих эффективность работы тепловой изоляции. Однако не всегда возможно прямое измерение теплофизических и радиационных характеристик конструкций ЭВТИ (особенно сложного состава). В этом случае использование средств компьютерного моделирования позволяет определять необходимые теплофизические характеристики (например, температуры слоев мата ЭВТИ) для расчета параметров эффективности ЭВТИ и предварительной оценки ее работоспособности.

Цель работы – разработка модели процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции при наличии внешнего теплового источника с помощью средств COMSOL MultiPhysics.

Задачи:

- 1) провести моделирование процесса теплопередачи в ЭВТИ при отсутствии воздушных зазоров между экранами;
- 2) на основе результатов, полученных из модели, вычислить коэффициент удельного термического сопротивления и результирующий

тепловой поток через ЭВТИ, провести их сравнение с экспериментальными данными;

3) провести моделирование процесса теплопередачи при наличии воздушного зазора между всеми экранами ЭВТИ и только между облицовочным слоем и первым экраном.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Тепловой режим работы космического аппарата

На космический аппарат (КА) и работу его систем в условиях космического пространства значительное влияние оказывают: невесомость, глубокий вакуум; радиационное и электромагнитное излучения, метеорное воздействие, тепловые нагрузки и др. [2]. Вопрос о тепловой защите до сих пор является достаточно важным аспектом при построении КА. Особенно актуально это для аппаратов, имеющих большие габариты и выступающих в роли космических станций [3].

Тепловое воздействие на КА обусловлено как внешним теплообменом (тепловое воздействие Солнца и солнечная энергия, частично отраженная от поверхности планеты), так и внутренним (выделение тепла от оборудования КА). Для регулирования теплового режима КА применяют систему терморегулирования. Это система, способная держать баланс между получаемой тепловой энергией и ее отдачей, перераспределяя тепловую энергию между конструкциями аппарата и обеспечивая таким образом его заданной температурой [2]. Основным требованием к терморегуляции КА является то, что температура каждого элемента КА в течение активного существования должна остаться в заданном рабочем диапазоне, при наличии различных видов теплообмена. При этом также необходимо учитывать возможные изменения, которые могут происходить в теплообмене из-за нескольких факторов таких как меняющееся со временем положение КА к падающему внешнему излучению и изменение свойств терморегулирующих поверхностей под воздействием ультрафиолетового и корпускулярного излучения космического пространства [2].

Тепловой режим КА определяется изменением его температурного поля, являющегося в данный промежуток времени совокупностью всех значений температур во всем объеме аппарата. В реальных условиях стационарное изменение тепловых потоков КА наблюдается редко. В основном это



нестационарный тепловой режим, когда приход тепловой энергии превышает ее расход и происходит рост температурного поля КА. Поэтому при нестационарных условиях для обеспечения требуемого температурного режима используют систему обеспечения теплового режима КА (СОТР). СОТР – тесно взаимодействующие между собой части конструкции КА для обеспечения и регулирования необходимого теплового режима при долгосрочной работе и выполнении всех поставленных задач [1; 4].

Известно большое число различных вариантов исполнения подсистем теплозащиты, входящих в СОТР, которые должны обеспечивать необходимый температурный режим [5]. Они делятся на активные и пассивные. Среди систем пассивного терморегулирования внешней поверхности корпуса КА с учетом тепловой защиты от солнечной радиации широко используется достаточно эффективное средство для ограничения теплового потока, закрывающее значительную часть КА – экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ), западный термин MLI (от multilayer thermal insulation) [6].

Принцип действия ЭВТИ основан на уменьшении поперечного теплообмена в многослойных средах с чередующимися отражающими и теплоизолированными слоями. Процесс же передачи тепла сквозь ЭВТИ представляет собой сочетание процессов передачи тепла излучением и теплопроводимостью газа, оказавшегося меж экранами [6].

Применение ЭВТИ позволяет значительно снизить интенсивность теплообмена с окружающим космическим пространством, обеспечивает защиту от воздействия высокоинтенсивного прямого солнечного излучения. А одним из преимуществ ЭВТИ перед другими подсистемами СОТР – является высокое термическое сопротивление при относительно малой плотности, надежность, простота установки и т. п. [1; 4].

## **1.2 Основные понятия теплообмена космического аппарата**

Теплообмен КА обусловлен внешним и внутренним тепловым воздействием. В настоящее время хорошо изучено три вида теплообмена: теплообмен за счёт теплопроводности вещества, конвективный теплообмен и

теплообмен излучением. В космическом пространстве теплообмен излучением является основным. Два других вида теплообмена либо отсутствуют, либо сведены до минимума. Так теплообмен за счет теплопроводности минимален, поскольку из-за шероховатости поверхностей, соприкасающихся элементов, в места контакта образуются газонаполненные промежутки [1]. Их наличие при воздействии внешних источников тепла приводит к так называемому «парниковому» эффекту меж экранном пространстве ЭВТИ. Особенно негативный эффект от этого между облицовочным слоем и первым экраном. Поскольку из-за перегрева температура первого экрана ЭВТИ при длительной эксплуатации будет превышать рабочую температуру и, в следствие, это может привести к его разрушению и ЭВТИ в целом [7]. Поэтому слои экранов ЭВТИ должны плотно прилегать друг другу или производится обезгаживание ЭВТИ (например, путем перфорации слоев) [1].

Рассмотрим основные факторы внешнего теплообмена КА. К ним относятся: тепловое излучение Солнца и планеты; положение КА на орбите; ориентация КА на орбите (теневая или освещенная Солнцем); состояние наружной поверхности КА; а так же различные виды излучения, воздействующие на него. Среди внешних тепловых потоков, воздействующих на КА, находящегося на определенной высоте от поверхности Земли, можно выделить следующие:  $Q_s$  – тепловой поток прямого солнечного излучения;  $Q_E$  – тепловой поток собственного планетного излучения;  $Q_R$  – тепловой поток отраженного от планеты солнечного излучения;  $Q_A$  – атмосферный тепловой поток;  $Q_{и}$  – тепловой поток собственного излучения КА. Из перечисленных, основную долю теплового потока, поглощенного поверхностью КА, составляют первые три [1].

Теплообмен излучением основывается на следующих законах: закон Планка, закон смещения Вина, закон Стефана-Больцмана и закон Кирхгофа. При проведении теплообмена КА используют оптические коэффициенты, определяющие процесс теплообмена с окружающим пространством. Первый коэффициент – это коэффициент поглощения солнечного излучения  $A_s$ ,

определяющий то, что 94 % энергии излучения Солнца приходится на диапазон длин волн от 0,2 до 2 мкм с максимумом излучения в видимой области спектра. Второй – степень черноты  $\varepsilon$ , определяющий энергию излучения Земли и самого КА находящуюся в диапазоне длин волн от 4 до 400 мкм. Необходимо во втором случае учитывать, что так как излучение КА и Земли находятся в одном диапазоне длин волн, то степень черноты поверхности КА равна коэффициенту поглощения собственного излучения Земли. И поэтому при подсчете теплообмена используют только степень черноты поверхности КА [1].

Тепловой поток, поглощенный поверхностью, КА определяется выражением [1]:

$$Q_{\text{погл}} = A_s(Q_s + Q_R) + \varepsilon Q_E. \quad (1)$$

С учетом всех составляющих внешнего теплообмена уравнение нестационарного теплового баланса имеет вид [1]:

$$(cm) \frac{dT}{d\tau} = Q_{\text{погл}} + Q_A \pm Q_{\text{И}} - Q_{\text{изл}}, \quad (2)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость конструкционного материала элемента КА;

$m$  – масса конструкции;

$T$  – среднemasсовая температура;

$\tau$  – время;

$Q_{\text{изл}}$  – тепловой поток собственного излучения конструкции.

Нестационарное тепловое состояние определяется изменением ориентации КА в пространстве, а также при переходе КА с «солнечного» участка орбиты в «тенево́й». В связи с этим температуры элементов конструкции КА меняются с течением времени.

Уравнение стационарного теплового баланса, при условии пренебрежения взаимным облучением между элементами конструкции КА имеет вид [1]:

$$Q_{\text{погл}} = Q_{\text{изл}}. \quad (3)$$

Из данного условия можно получить выражение, определяющее среднюю температуру по поверхности элемента КА [1].

### 1.3 Параметры эффективности экранно-вакуумной теплоизоляции

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) – одно из наиболее эффективных средств пассивной системы терморегулирования космических аппаратов, для обеспечения определенного температурного режима. С помощью ЭВТИ можно значительно снизить интенсивность теплового обмена КА с окружающей средой, т.е. уменьшить тепловые потоки, поступающие к элементам конструкции от Солнца. ЭВТИ сконструирована таким образом, чтобы свести к минимуму теплообмен теплопроводностью газа, находящегося между экранами. Это достигается за счёт разделительных слоев с низкой плотностью и теплопроводностью; наличием в конструкции вентиляционных отсеков, позволяющих воздуху покидать пространство между отсеками после выведения КА на орбиту [1; 8].

При падении лучистого потока от внешних источников на поверхность ЭВТИ часть будет отражаться от нее, а часть поглощаться верхним облицовочным слоем. Это приводит к его нагреву и он начинает излучать тепло в обе стороны. Теплота внутри ЭВТИ будет передаваться теплообменом излучением. Примерная тепловая схема ЭВТИ показана на рисунке 1 [1; 9].

Плотность теплового потока через ЭВТИ, согласно уравнению теплообмена излучением, определяется [1]:

$$q_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma}{n} (T_0^4 - T_n^4), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_{i+1}} - 1}$  – приведенная степень черноты между экранами ЭВТИ в глубине;

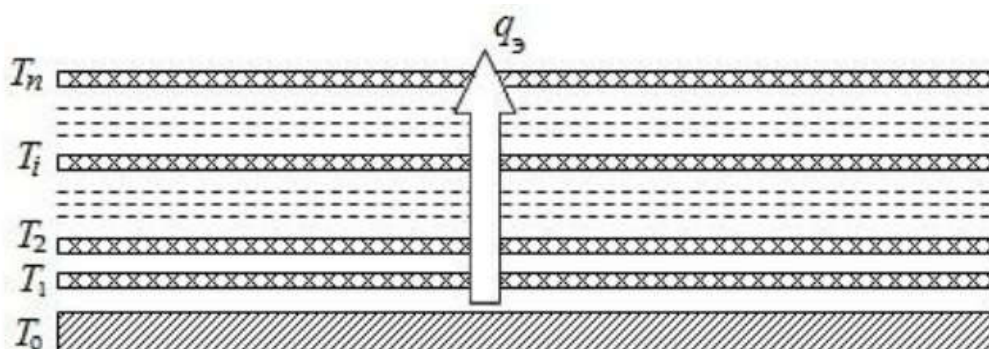
$\varepsilon_i$  – степень черноты облицовочного слоя;

$\varepsilon_{i+1}$  – степень черноты первого экрана ЭВТИ;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$n$  – количество экранов (слоев мата ЭВТИ);

$T_0 - T_n$  – разность температур первого и n-го экрана.



$T_0$  – температура поверхности конструкции, защищаемой ЭВТИ;  $n$  – число экранов (слоев) ЭВТИ;  $T_n$  – температура наружного экрана ЭВТИ;

$q_3$  – плотность теплового потока через ЭВТИ

Рисунок 1 – Тепловая схема ЭВТИ [9]

Степень эффективности ЭВТИ может быть определена отношением плотности теплового потока  $q_3$  через ЭВТИ к плотности потока при отсутствии ЭВТИ  $q_0$  [1]:

$$\frac{q_3}{q_0} = \frac{T_n^4}{T_0^4} = \frac{1}{1+n(2-\varepsilon_i)}. \quad (5)$$

Эффективность ЭВТИ возрастает с уменьшением этого отношения. Этого можно достигнуть, как видно из формулы (2), увеличением количества экранов и использованием экранов с низким значением степени черноты. Однако первое условие не приемлемо, поскольку будет утяжелять конструкцию ЭВТИ [1].

Вторым параметром, определяющим эффективность ЭВТИ, является удельное термическое сопротивление  $R_{уд}^э$  [1; 8]. Для его расчета используют следующее выражение [1]:

$$R_{уд}^э = \frac{T_0 - T_n}{q_э}. \quad (6)$$

Для современных ЭВТИ значения удельного термического сопротивления находятся в диапазоне от 30 до 250 (К·м<sup>2</sup>)/Вт.

#### 1.4 Математические модели теплообмена в многослойной конструкции экранно-вакуумной теплоизоляции

Рассмотрим несколько математических моделей, описывающих процесс теплообмена в многослойной конструкции как излучением, так и теплопередачей.

В работе [10] автором представлено рассмотрение теплообмена в многослойной конструкции теплопроводностью без излучательных процессов. Предполагается, что каждый слой (рисунок 2) имеет разные коэффициенты теплопроводности ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ ) и разную толщину ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta_3$ ). Температуры наружных поверхностей  $T_{ст1}$  и  $T_{ст4}$  известны.

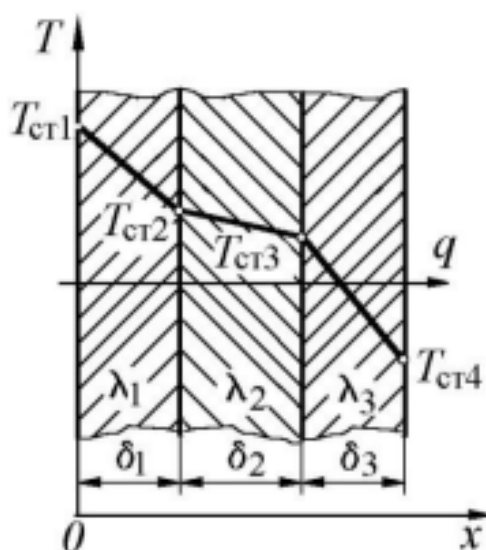


Рисунок 2 – Многослойная стенка [10]

Изменение температуры по сечению многослойной стенки представляет собой ломанную, проходящую через все слои. Интенсивность изменения температуры в каждом слое тем больше, чем меньше коэффициент теплопроводности данного слоя. На основании выражения плотности теплового потока для каждого слоя можно записать [10]:

$$q_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1} = T_{ст1} - T_{ст2}, \quad (7)$$

$$q_2 \frac{\delta_2}{\lambda_2} = T_{ст2} - T_{ст3}, \quad (8)$$

$$q_3 \frac{\delta_3}{\lambda_3} = T_{ст3} - T_{ст4}. \quad (9)$$

В результате суммирования обеих частей этих уравнений, с учетом того, что  $q_1 + q_2 + q_3 = q$ , получим [10]:

$$q = \frac{T_{ст1} - T_{ст4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}. \quad (10)$$

Из полученной формулы следует, что плотность теплового потока через многослойную стенку пропорциональна суммарному температурному напору (разности температур на наружных поверхностях многослойной конструкции) и обратно пропорциональна полному тепловому сопротивлению конструкции, равному сумме тепловых сопротивлений ее отдельных слоев [10].

Для уменьшения теплового потока, воздействующего из внешней среды на внешнюю поверхность многослойной конструкции, необходимо нанести слой материала с низким коэффициентом теплопроводности (теплоизолятор). Для определения необходимой толщины теплоизоляционного покрытия и уменьшения тепловых потерь  $q_{пот}$  до допустимых значений, в работе [10]

автором была рассмотрена плоская стенка с толщиной  $\delta$ , покрытая тепловой изоляцией (рисунок 3).

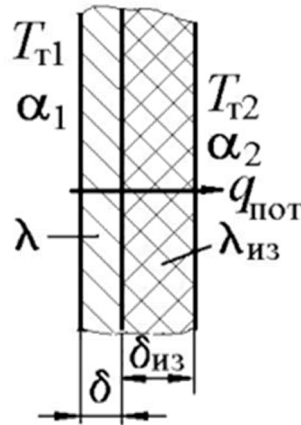


Рисунок 3 – Теплоизоляция плоской стенки [10]

Температуры для изолированной и внешней среды равны  $T_{T1}$  и  $T_{T2}$ , а коэффициенты теплоотдачи –  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Так же известны коэффициенты теплопроводности стенки  $\lambda$  и изоляции  $\lambda_{из}$ , а тепловое сопротивление контакта считается отсутствующим ( $R=0$ ). По заданному значению  $q_{пот}$  определено допустимое значение коэффициента теплопроводности для стенки с теплоизоляцией [10]:

$$k_{из} = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Отсюда вычисляется необходимая толщина теплоизоляционного покрытия для плоской стенки [10]:

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left( \frac{1}{k_{из}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{\delta}{\lambda} \right). \quad (12)$$

На основе полученных результатов автором был сделан вывод, что чем толще слой изоляции и чем меньше коэффициент теплопроводности



изолирующего материала, тем меньше коэффициент теплопередачи через стенку [10].

Юртаев Е.В. в работе [11] предложил многоузловую математическую модель многослойной ЭВТИ (рисунок 4). Построение расчетной схемы многоузловой модели ЭВТИ выполнялась в предположение, что масса ЭВТИ сосредоточена на экранах, температура экранов одинакова, как вдоль пленки, так и по её толщине слоя.

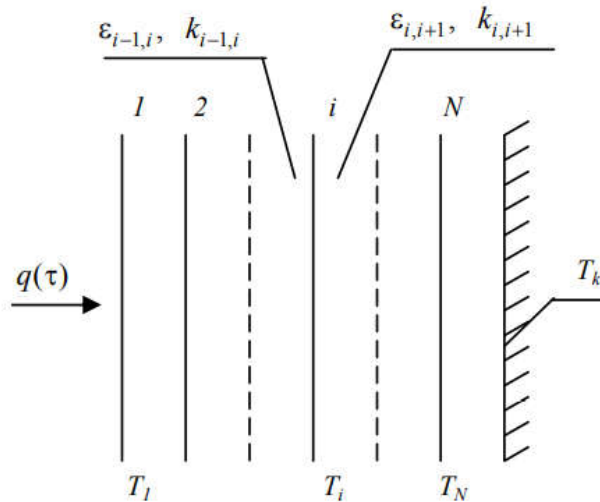


Рисунок 4 – Многоузловая модель ЭВТИ [11]

Автор работы [11] предложил дифференциальные уравнения теплового баланса для внешнего и внутреннего экранов с учетом передачи тепла излучением и теплопроводностью:

$$\left(\frac{cm}{F}\right)_1 \frac{dT_1}{d\tau} = q_{\text{внеш}}(\tau) - \varepsilon_i \sigma_0 T_1^4 + \varepsilon_{np1,2} \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) + k_{1,2} (T_2 - T_1), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{cm}{F}\right)_N \frac{dT_N}{d\tau} = & \varepsilon_{npN-1,N} \sigma_0 (T_{N-1}^4 - T_N^4) + k_{N-1,N} (T_{N-1} - T_N) + \\ & + k_3 (T_k - T_N), \end{aligned} \quad (14)$$

где N – число экранов ЭВТИ;

F – площадь излучающей поверхности;

$q_{\text{внеш}}$  – плотность внешнего теплового потока;

$k$  – коэффициент конвективной теплопередачи между экранами;

$T_k$  – температура  $k$ -того узла конструкции КА, закрытого ЭВТИ;

$k_э$  – коэффициент теплопередачи от  $N$ -го внутреннего слоя к конструкции.

Автор работы [11] показал, что результаты многоузловой модели ЭВТИ имеют достаточную сходимость для проведения тепловых анализов ЭВТИ КА.

В работе [12] Цаплина С.В. рассматривается плоский фрагмент космического аппарата, на поверхности которого расположен пакет ЭВТИ (рисунок 5). На поверхность ЭВТИ воздействует внешний тепловой поток с плотностью  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . В предлагаемой модели экраны ЭВТИ расположены металлической стороной внутрь, а температура внешней оболочки и полиэтилентерефталатная пленка экранов принимается за постоянную.

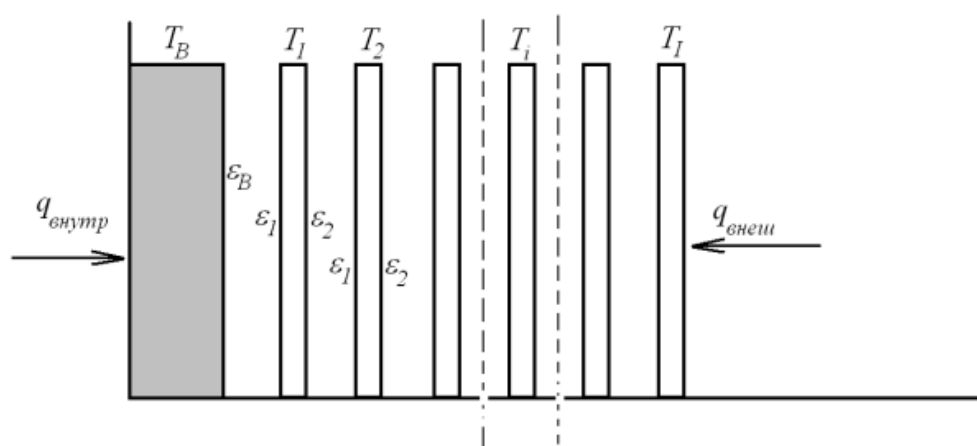


Рисунок 5 – Расчетная схема ЭВТИ при воздействии внешнего теплового потока [12]

Автор предлагает систему нелинейных дифференциальных уравнений изменения температуры оболочки и каждого слоя ЭВТИ с учетом переноса тепла только излучением [12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_B \rho_B h_B \frac{dT_B}{dt} = q_{\text{внутр}} + \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_B, \varepsilon_1) \sigma (T_I^4 - T_B^4), \\ c_f \rho_f h_f \frac{dT_1}{dt} = \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_B, \varepsilon_1) \sigma (T_1^4 - T_B^4) + \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \sigma (T_2^4 - T_1^4), \\ c_f \rho_f h_f \frac{dT_i}{dt} = \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \sigma (T_{i-1}^4 - T_i^4) + \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \sigma (T_{i+1}^4 - T_i^4), \\ c_f \rho_f h_f \frac{dT_I}{dt} = A_{S2} q_{\text{внеш}} - \varepsilon_2 \sigma T_1^4 + \varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \sigma (T_{1-I}^4 - T_I^4), \end{array} \right. \quad (15)$$

где  $I$  – число экранов;

$T_B$  – температура тела;

$T_i$  – температура экранов;

$\rho$  – плотность материала экранов;

$h$  – толщина экранов;

$\varepsilon_B, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степень черноты оболочки КА, алюминия, экранов ЭВТИ;

$A_{S2}$  – коэффициент поглощения солнечного излучения для экранов;

$q_{\text{внутр}}$  – плотность внутреннего теплового потока, подводимого к внутренней поверхности оболочки.

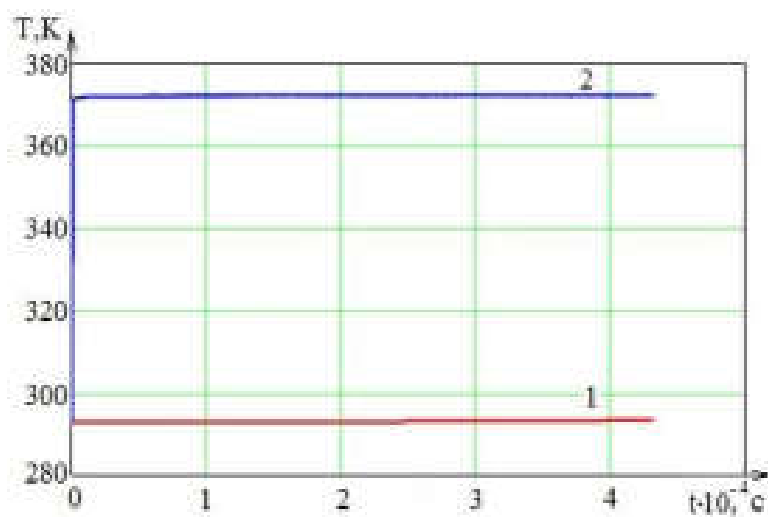
В формуле (16) индекс  $B$  относится к оболочке КА, а индекс  $f$  к экрану ЭВТИ.

Решение системы уравнений (16) находится только численно. Для стационарного случая существует аналитическое решение [12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_B = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{A_{S2} q_{\text{внеш}}}{\varepsilon_2} + (I (\varepsilon_{\text{пр}}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)) + \frac{1}{\varepsilon_B}) q_{\text{внутр}} \right\}}, \\ T_i = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{A_{S2} q_{\text{внеш}}}{\varepsilon_2} + \left( \frac{I-i+1}{\varepsilon_2} + \frac{I-i}{\varepsilon_1} - (I-i) \right) q_{\text{внутр}} \right\}}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Это решение использовано автором работы [12] для исследования изменения температурного поля оболочки КА и экранов ЭВТИ в зависимости от времени, при воздействии прямого солнечного излучения и при отсутствии внутреннего теплового потока. Расчет проводился для поверхности КА из углепластика толщиной 2 см, покрытого пакетом ЭВТИ-Б1 с известными теплофизическими характеристиками. Результаты вычислений,

представленные в виде графических зависимостей температуры оболочки и внешнего экрана от времени, приведены на рисунке 6. По полученной зависимости автор работы [12] установил, что внешний экран за короткий промежуток времени (около 10 секунд) достигает своей равновесной температуры, а температура оболочки за 4 часа поднимается на 1 К.



1 – оболочка, 2 – внешний экран ЭВТИ

Рисунок 6 – Зависимость  $T(t)$  оболочки и внешнего экрана [12]

Автор предполагает, что для того, чтобы оболочка сохраняла свою температуру постоянной к ней необходимо подводить тепловой поток с определенной плотностью  $q_{\text{внутр}}$ , которая находится из решения стационарной задачи. Так же автором были определены значения удельного сопротивления, рассматриваемого ЭВТИ, и эффективный коэффициент теплопроводности пакета ЭВТИ. Показано, что полученные результаты, представленной модели, соответствуют стандартам ЭВТИ с точностью 10 %.

В работе [13] Крайновой И.В. представлена уточненная математическая модель теплопереноса в ЭВТИ, учитывающая наличие разделительных слоев между экранами и проведено исследование эффективности полученной модели. Автором разработана программа, написанная на языке FORTRAN, позволяющая вычислять тепловые потоки в исследуемом образце ЭВТИ. Уточненная математическая модель основывается на традиционной тепловой

модели, но при этом учитывается наличие разделители между экранами и его влияние на перенос тепла между экранами. Также в модели учитываются спектральные характеристики поверхностей.

В работе [13] рассматривается элемент ЭВТИ, состоящий из 2-х экранов, между которыми расположен разделительный слой из полупрозрачного волокнистого материала (рисунок 7).

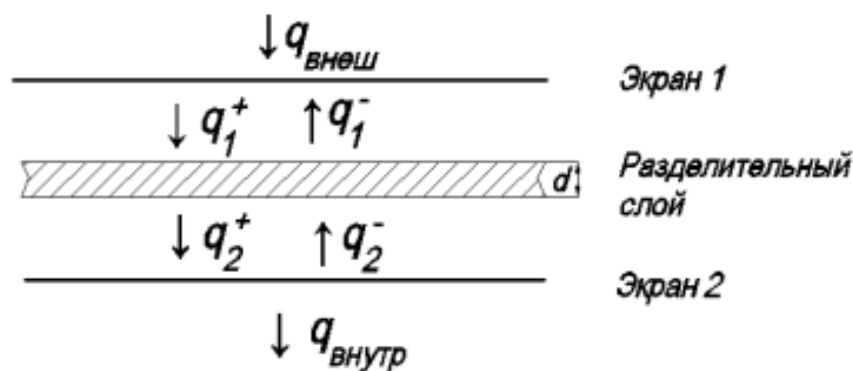


Рисунок 7 – Схема задачи [13]

Расчет теплопереноса по данной схеме проводился при следующих допущениях: перенос тепла происходит только нормально к поверхности экранов; между разделительным слоем и экранами ЭВТИ нет теплового контакта; теплоперенос происходит излучением; теплоемкость каждого из слоев ЭВТИ очень мала; изменение внешних условий теплообмена происходит медленно. Эти допущения позволяют упростить решение задачи, считая, что реализуется квазистационарный режим теплообмена. И в таких условиях тепловой поток через ЭВТИ может быть определен на основе решения стационарной задачи.

Из уравнения баланса потоков излучения в зазорах между слоями экранов и разделителя было получено выражение для потока излучения через ЭВТИ [13]:

$$q_{\lambda} = \frac{f_{1,\lambda} - f_{2,\lambda}}{\frac{1}{\varepsilon_{1,\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,\lambda}} + \frac{2}{1 + T_{\lambda} - R_{\lambda}} - 2}, \quad (17)$$

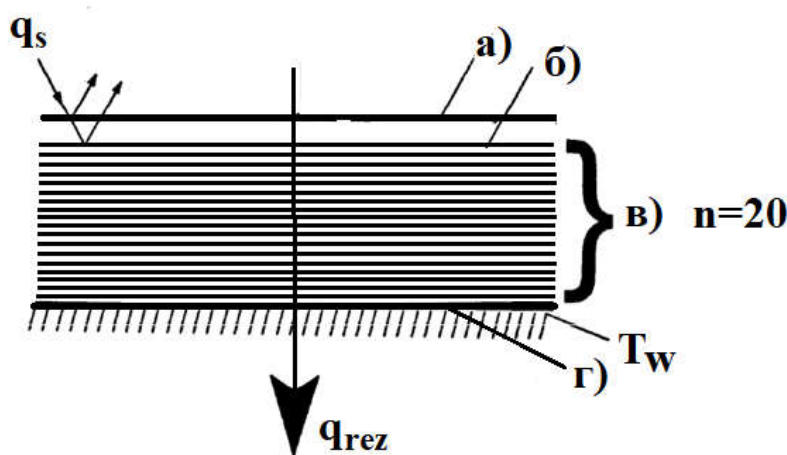
где  $\varepsilon_{1,\lambda}$ ,  $\varepsilon_{2,\lambda}$  – излучательная способность экранов при температурах  $T_1$  и  $T_2$ ;  
 $f_\lambda = \pi B_\lambda(T)$  – поток излучения абсолютно черного тела с температурой  $T$ ;  
 $B_\lambda(T)$  – функция Планка;  
 $T_\lambda$  и  $R_\lambda$  – пропускательная и отражательная способность разделителя.

В расчетной модели учтено также возможное наличие тонкого оксидного слоя на поверхности алюминиевых экранов ЭВТИ и оценено влияние такой пленки на излучательную способность крана. Результаты расчетов показали, что наличие оксидного слоя увеличивает потока теплового излучения через слой ЭВТИ [13].

## 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Экранно-вакуумная теплоизоляция

Конструкция ЭВТИ состоит из внешнего и внутреннего облицовочных слоев, между которыми расположен мат ЭВТИ, состоящий из  $n$ -го количества экранов, разделенных низкотеплопроводным материалом (рисунок 8) [7]. Количество слоев может быть от 10 до 100 штук. Слои должны иметь толщину как можно меньшую и в то же время достаточную для обеспечения прочностной жесткости конструкции. Конструкция ЭВТИ вакуумируется, то есть пространство между экранами с безвоздушными зазорами.



а) обшивка пакета ЭВТИ с терморadiационными характеристиками:

$$R_{sc}, D_{sc}, A_{sc}, \varepsilon_c, T_c;$$

б) первый слой мата ЭВТИ – экран толщиной 20 мкм с характеристиками:

$$R_s, D_s, A_s, \varepsilon, T;$$

в) мат ЭВТИ, состоящий из 20 экранов, разделенных пленкой  
низкотеплопроводящего материала;

г) нижний облицовочный слой

Рисунок 8 – Схема теплообмена пакета ЭВТИ в космическом пространстве [7]

Особые требования к применениям пакетов ЭВТИ определяются стандартами, разработанными ЦНИИМаш. В соответствии с ними для различных температурных условий разработаны разные виды ЭВТИ,

отличающиеся друг от друга эксплуатационными параметрами и составными частями пакетов. Некоторые температурные условия эксплуатации и состав ЭВТИ представлены в таблицах 1 и 2 [9].

Таблица 1 – Температурные условия эксплуатации пакетов ЭВТИ [1]

Марка ЭВТИ	Температура, °С	
	Минимальная	Максимальная
ЭВТИ-А, ЭВТИ-Б, ЭВТИ-В	-269	150
ЭВТИ-И		300-500 (до 3 минут)
ЭВТИ-Г, ЭВТИ-Г1, ЭВТИ-Д		500

Таблица 2 – Технические характеристики пакетов ЭВТИ [9]

Марка ЭВТИ	Состав
ЭВТИ-А	Пленка ПЭТ металлизированная марки К, ОА, 5 мкм по ТУ 6-00-21680878-01; холст стекловолокнистый ХСВН-7 по ТУ 6-48-05786904-147
ЭВТИ-Б	Пленка ПЭТ металлизированная марки К, ОА, 5 мкм, формованная на металлической сетке № 4-1,0 по ГОСТ 3826
ЭВТИ-В	Пленка ПЭТ металлизированная марки К, ОА, 5 мкм, сдублированная с холстом стекловолокнистым ХСВН-7 при формовании на металлической сетке № 4-1,0
ЭВТИ-Г	Фольга А5-М-0,01 или АД1-М-0,01 по ГОСТ 618; холст стекловолокнистый ХСВН-7
ЭВТИ-Г1	Фольга А5-М-0,02 или АД1-М-0,02; холст стекловолокнистый ХСВН-7



ЭВТИ-Д	Фольга А5-М-0,01 или АД1-М-0,01, сдублированная с холстом стекловолнистым ХСВН-7 при формовании на металлической сетке № 4-1,0
ЭВТИ-И	Пленка ПМ-1ЭУ-ОА-0,02 по ТУ 6-00-21680878-02, сдублированная с холстом стекловолнистым ХСВН-7 при формовании на металлической сетке № 4-1,0

Более востребованной, на данный момент, является марка типа ЭВТИ-2В на основе гофрированной полиэтилентерефталатной пленки ПЭТФ-ДА, металлизированной с двух сторон алюминием, а так же со стекловуалями, использующиеся в качестве разделительной перегородки. Но этот тип ЭВТИ не является универсальным и не обладает стабильными теплофизическими характеристиками [9].

При рабочей температуре ЭВТИ до 423 К (умеренный диапазон температур) используются полиэтилентерефталатные пленки с напылением алюминия, серебра и золота. При температурах превышающий умеренный диапазон вплоть до 723 К – алюминиевая или никелевая фольга с прокладками из стекловолна или кварцевого холста. А при температуре свыше 723 К будет использоваться фольга из меди, никеля или стали с кварцевым волокном в качестве прокладочного материала [5].

В условиях вакуума теплопередача в ЭВТИ происходит в основном теплообменом излучением, а теплообмен теплопроводностью и конвективный сведены к минимуму. Для уменьшения лучистого теплообмена, пленку металлизуют тонким слоем алюминия с одной или двух сторон. Это позволяет обеспечить коэффициент черноты экрана  $\varepsilon_c \leq 0,1$ . Напыление из металла используется для придания поверхности пленки определенных термооптических характеристик. Для уменьшения конвективного теплообмена и уменьшения плотности укладки на поверхности пленки создают рифленность. Также устанавливают прокладки между экранами из

низкопроводящих материалов для улучшения теплоизолирующих свойств [6; 9; 14]. Для обезгаживания конструкции ЭВТИ экраны теплоизоляции имеют перфорацию в виде отверстий диаметром 2 мм с расстоянием между ними 10 мм [7]. Внешняя поверхность ЭВТИ (обшивка пакета), выполняющая роль излучательного радиатора, покрывается специальной тканью с оптическими характеристиками излучения и поглощения светового потока  $\varepsilon_c$  и  $A_{sc}$  [14].

Материалы, используемые для изготовления ЭВТИ, должны обладать определенными терморadiационными характеристиками [6]. К ним относятся: степень черноты (излучение) ( $\varepsilon_c$ ), отражение ( $R$ ), пропускание ( $D_{sc}$ ) и поглощение солнечного излучения ( $A_{sc}$ ), коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоемкость ( $c$ ) и удельное термическое сопротивление ( $R_{уд}^3$ ) [9].

Степень черноты (излучение) определяет излучательную и поглощательную способности по отношению к собственному тепловому потоку Земли. Коэффициент поглощения солнечной радиации определяет поглощательную способность прямого и отраженного от Земли солнечного излучения. В свою очередь коэффициент отражения и пропускания определяют отражательную и пропускательную способность [9]. Коэффициент теплопроводности характеризует способность передавать тепло, и зависит от природы вещества, из которого изготовлен материал, и его температуры [10].

Термическое сопротивление ЭВТИ  $R_{sc}$  определяется количеством и плотностью укладки слоев, т.е. числом слоев на 1 см. Для количества слоев от 10 до 40 толщина ЭВТИ равна от 5 до 28 мм, величина термического сопротивления  $R_{sc}$  от 20 до 45 м<sup>2</sup> · К/Вт [14].

Помимо терморadiационных характеристик, материалы должны обладать и механическими свойствами такими, как прочность, жесткость, стойкость к воздействиям факторов космического пространства при рабочем диапазоне температур от 120 до 2000 К. Они должны иметь высокую температур плавления и низкий коэффициент термического расширения. С позиции экономии массы ЭВТИ пластины должны иметь толщину как можно меньше и в то же время достаточную, чтобы обеспечить необходимую прочность и

жесткость конструкции. Тогда лучистый тепловой поток, падая на пластину, расходуется на повышение температуры за счет объемной теплоемкости, а также на излучение к соседним пластинам. Вследствие малого термического сопротивления отдельные пластины будут прогреваться мгновенно [15].

## 2.2 Пакет прикладных программ COMSOL MultiPhysics

COMSOL MultiPhysics – программа для численного моделирования и решения различных научных и инженерных задач. Пакет COMSOL MultiPhysics предоставляет возможность моделирования физических процессов, описываемых частными дифференциальными уравнениями. Программа обладает большим разнообразием решателей, что позволяет пользователю решать самые сложные задачи. При этом нет какой-либо необходимости в предварительном изучении модулей, так как пользователь приложения использует только входные данные и результаты моделирования [16].

С помощью физических интерфейсов можно выполнять различные виды исследований. В список доступных задач входят такие, как: задачи на постоянный и переменный ток; акустические задачи; моделирование источников питания; модуль химических реакций; модуль гидродинамики и потоков и др. [16].

Модуль *Heat Transfer* – это пакет, позволяющий моделировать тепловые потоки в среде с помощью специальных физических интерфейсов и функций, с поддержкой всех основных механизмов теплообмена (теплопроводность, конвективный теплообмен и теплообмен излучением). Модуль *Surface-to-Surface Radiation* – это пакет, позволяющий моделировать тепловые потоки излучения от поверхности к поверхности [16; 17]. Эти два модуля могут быть использованы в мультифизической связке.

В начале моделирования выбирается тип моделируемого пространства – 2D или 3D, и необходимый интерфейс физического процесса. В случае моделирования теплообмена теплопередачей и излучением – это интерфейс *Heat Transfer* с модулями *Heat Transfer in Solid* и *Surface-To-Surface Radiation*, которые связываются между собой мультифизической связкой *Heat Transfer*

with *Surface-To-Surface Radiation*. Выбирается тип временного исследования – *Time Dependent*. На основе выборов формируется дерево модели *Model Builder* (рисунок 9), ветви которого содержат необходимые узлы моделирования [16; 17].

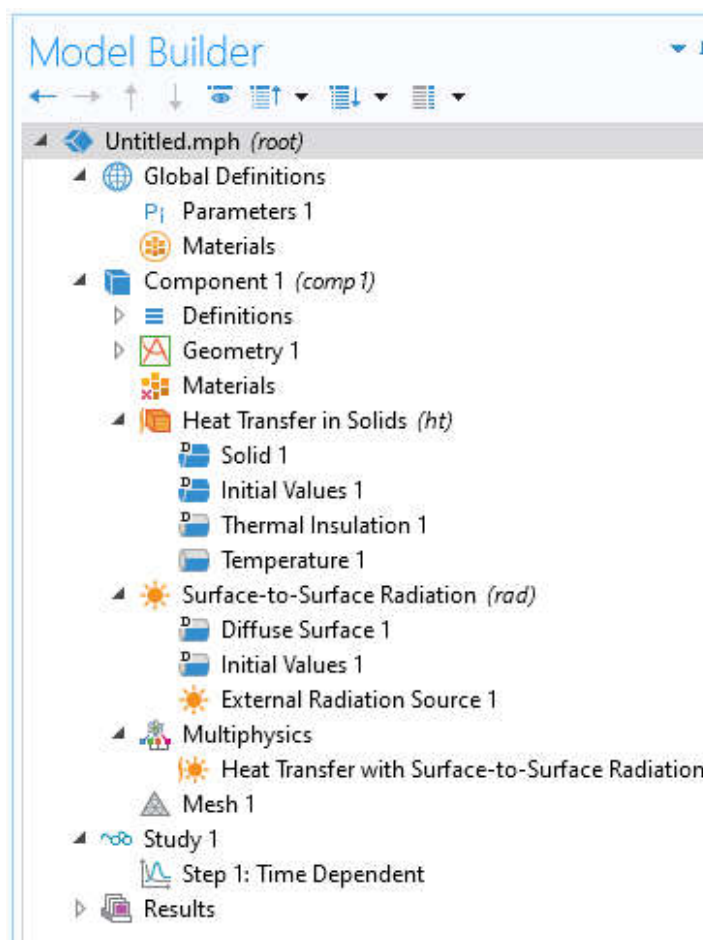


Рисунок 9 – Дерево модели

Процесс моделирование состоит из следующих этапов.

1) Введение параметров окружающей среды и переменных в *Global Definitions* в подузле *Parameters*.

2) Построение геометрии объекта в *Geometry*. С помощью функции *Block* задаются геометрические параметры, и осуществляется построение тела необходимой формы и положения в координатной плоскости (рисунок 10).

3) Задание материалов построенной модели производится в узле *Materials*. Встроенная библиотека COMSOL позволяет подобрать необходимые материалы, с известными терморрадиационными и оптическими характеристиками (рисунок 11).

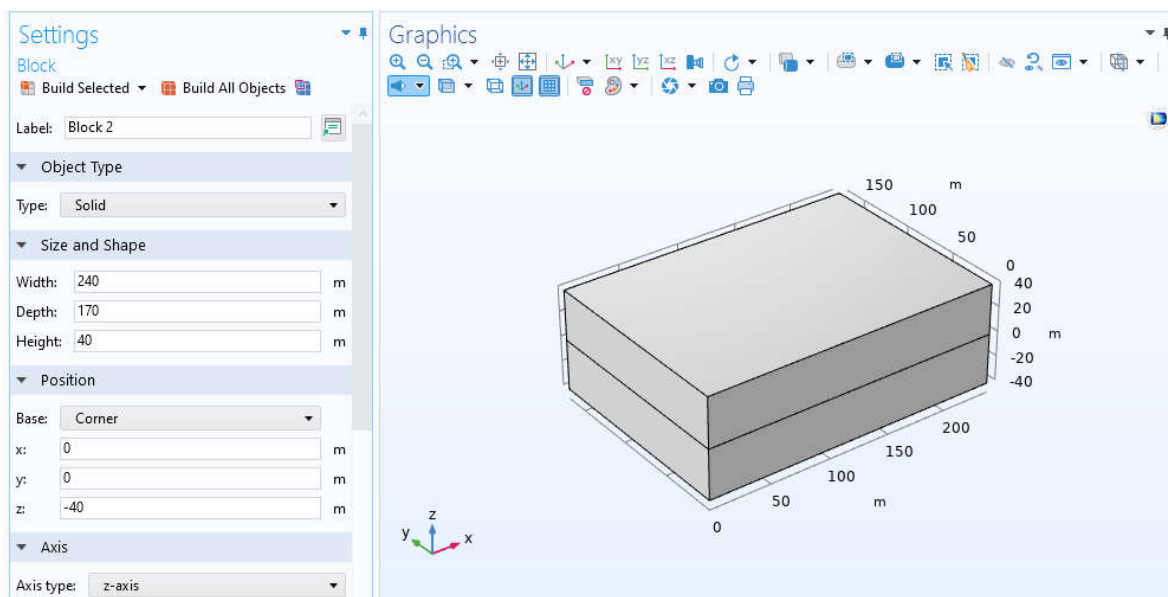


Рисунок 10 – Построение модели

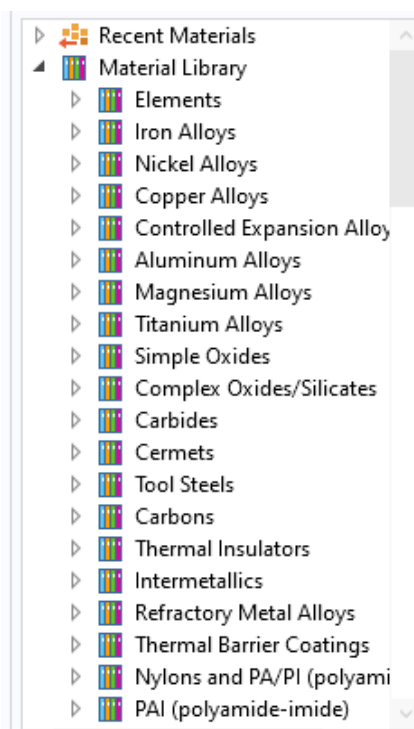


Рисунок 11 – Библиотека материалов

4) В интерфейсах *Heat Transfer in Solids* и *Surface-to-Surface Radiation* можно посмотреть уравнение теплообмена теплопроводность и излучением, заданные в дифференциальной форме. В интерфейсе *Heat Transfer in Solids*, который позволяет решить уравнение теплопроводности в пределах домена,

связанного с нагретым внешним источником (тепловой поток от солнца) образцом, задаются начальные и граничные условия, условие теплоизоляции.

Интерфейс *Surface-to-Surface Radiation* определяет плотность теплового потока, проникающего в материал. В данном интерфейсе задаются также начальные и граничные условия. С помощью подузла *Diffuse Surface* задали постоянную степень черноты на поверхности образца.

5) Создается сетка разбиения *Mesh*. Расчетная сетка представляет собой тетраэдры для решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов (рисунок 12).

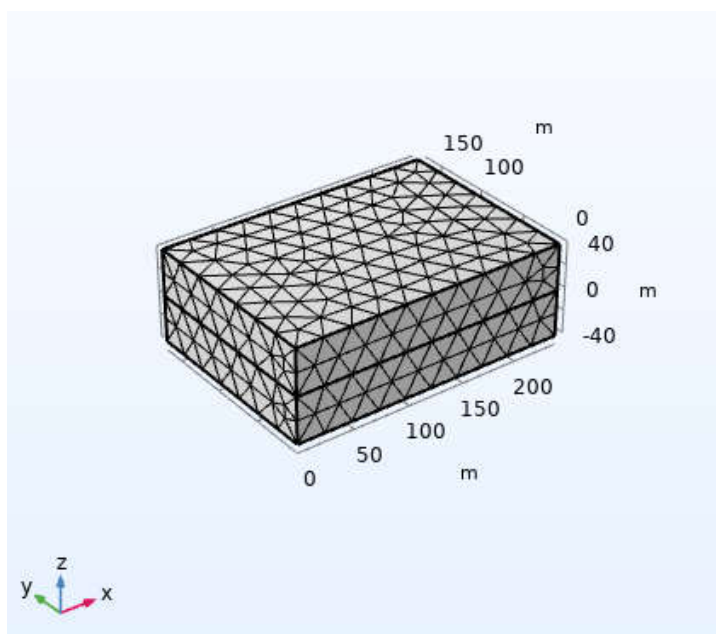


Рисунок 12 – Расчетная сетка модели

6) Установки на расчет и исследования в ветке решения *Study Step*.

7) Анализ и визуализация результатов в *Results*. Результатом исследования является температурный профиль модели, при котором можно узнать температуру каждого слоя.

Даже после получения результатов можно изменять параметры, геометрию и материалы конструкции, что удобно при исследовании теплообмена в сложных конструкциях.

## **2.3 Сравнение программного обеспечения для моделирования тепловых процессов**

Программное обеспечение, позволяющее моделировать разнообразные физические процессы решает одну из проблем – проведения реальных экспериментов, которые бывают иногда слишком затратными или длительными по времени проведения.

В настоящее время существует несколько программных комплексов COMSOL MultyPhysics, ANSYS MultyPhysics, Thermica, ESATAN-TMS, SINDA и Radsol которые позволяют моделировать тепловые процессы [13; 18].

Рассмотрим преимущества и недостатки и основные отличия двух лидеров среди коммерческих программ в области моделирования разных физических процессов – это COMSOL MultyPhysics и ANSYS MultyPhysics. Программы обладают схожим функционалом моделирования физических процессов, дают удовлетворительные численные решения. Но при этом эти программы отличаются по своей концепции.

COMSOL представляет собой единый продукт, а программа ANSYS имеет один препроцессор (Preprocessor), один процессор решения (Solution), два постпроцессора (General Postprocessor и Time History Postprocessor) и несколько вспомогательных процессоров. Препроцессор используется для выбора типа конечного элемента, задания свойств материалов, создания геометрической модели и конечноэлементной модели конструкции [19; 20].

В COMSOL при использовании любого интерфейса всегда видна постановка задачи, уравнения, описывающие процесс и краевые условия. Кроме этого есть возможность пользователю самому добавлять уравнения и дополнительные условия. В ANSYS математическая постановка решаемой задачи скрыта от пользователя и поэтому при выборе уравнений необходимо четко понимать к какой теории они относятся [20].

Важным при выборе программного продукта также является его стоимость на рынке и предъявляемые системные требования. В последнем ANSYS выигрывает перед COMSOL, а также он предоставляет бесплатную

студенческую версию с 90 % функционалом основной версии. Но коммерческая цена лицензии ANSYS в четыре раза выше чем у COMSOL. Хотя COMSOL и предоставляет лишь двух недельную бесплатную версию с ограниченным функционалом. Но он имеет более приятный и понятный интерфейс, большую встроенную библиотеку материалов, огромное количество бесплатных обучающих вебинаров, блоков и уже решенных задач [20].



## 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

### 3.1 Настройка моделей и условий

Очень важно при расчете параметров эффективности ЭВТИ и предварительной оценки ее работоспособности знание значения температуры первого экрана мата ЭВТИ. Не всегда возможно прямое измерение терморadiационных характеристик конструкций ЭВТИ, особенно имеющих разное сочетание материалов экранов мата ЭВТИ, облицовочных и разделительных слоев. Кроме этого, оценка значения температуры первого экрана мата ЭВТИ при разработке новой конструкции необходима, чтобы оценить влияние «парникового эффекта» возникающего из-за воздушного зазора между облицовочным слоем и первым экраном мата ЭВТИ. Наличие этого зазора приводит повышению рабочей температуры первого экрана (от 110 °С до 115 °С) и при длительной эксплуатации ЭВТИ в данных условиях происходит разрушение этого и последующих экранов.

Использование средств COMSOL MultiPhysics позволяет получить модель процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции при наличии внешнего теплового источника, результатом которой будет температурный профиль ЭВТИ. Это дает возможность предварительно оценить эффективность новых конструкций ЭВТИ без проведения экспериментальных измерений.

В данной работе с помощью средств COMSOL MultiPhysics разработана модель процесса теплопередачи в ЭВТИ. Материалы ЭВТИ выбраны аналогичными, тем что описаны в работе [7], для последующего сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными этой работы. При моделировании учитывалось, что на облицовочный слой экранно-вакуумной теплоизоляции воздействует внешний тепловой источник, представленный прямым солнечным тепловым потоком с плотностью потока 1400 Вт/м<sup>2</sup>. При моделировании считалось, что КА находится на «солнечной» стороне орбиты и

это дает известное значение температуры облицовочного слоя. Предполагалось, что процесс теплопередачи в ЭВТИ осуществляется механизмами излучения и теплопроводности.

В начале моделирования выбирался тип моделируемого пространства – 3D, и необходимый интерфейс физического процесса. Моделирование процесса теплопередачи в программе COMSOL Multiphysics проводилось с использованием интерфейсов *Heat Transfer in Solids* (Теплопередача в твердых телах) и *Surface-to-Surface Radiation* (Излучение от поверхности к поверхности) связанных мультифизической связкой *Heat Transfer with Surface to Surface Radiation* (Теплопередача с излучением от поверхности к поверхности) (рисунок 13). Тип временного исследования выбран *Time Dependent*, для исследования теплопередачи за определенный временной промежуток.

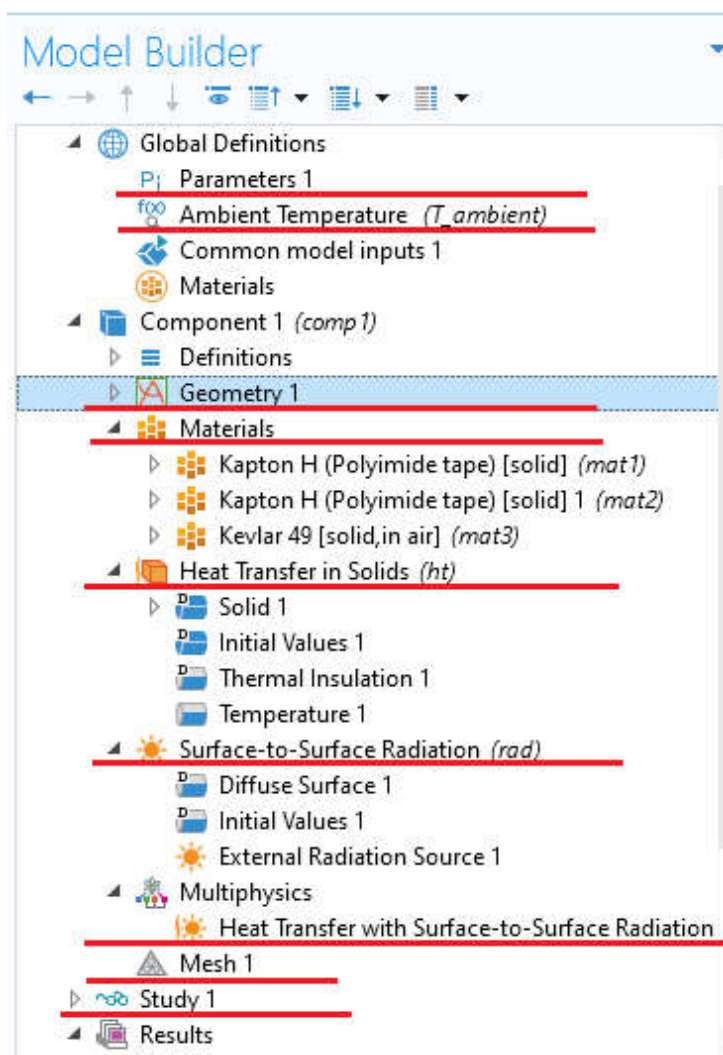


Рисунок 13 – Дерево модели

Моделирование проводилось при нестационарных условиях, то есть когда температура облицовочного слоя является функцией времени. Изменение температуры с течением времени считалось за 10 часов.

На первом этапе в узле *Global Definitions* в подузлах *Parameters* и *Ambient Temperature* (рисунок 14) были заданы значения температуры окружающей среды (в данном случае температура на поверхности облицовочного слоя равная 150 °С).

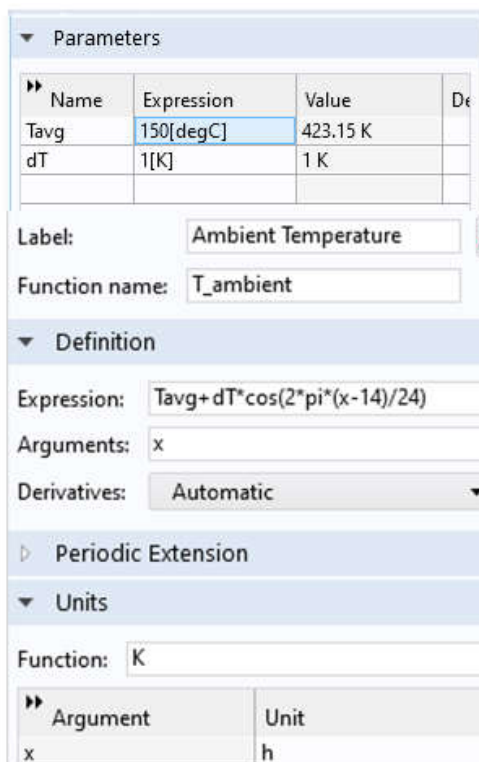


Рисунок 14 – Параметры окружающей среды

Далее в узле *Component* с помощью подузлов *Geometry* и *Materials* выполнялось построение геометрии и выбор материалов слоев. Исследовалась теплопередача в нескольких моделях.

Модель 1 – ЭВТИ при отсутствии воздушных зазоров между экранами (рисунок 15):

1) облицовочный слой (кевлар) – в виде параллелепипеда с размерами 240×170×50 мкм (верхний блок на рисунке 15);

2) тонкий металлизированный слой (алюминий) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 10$  мкм располагается над поверхностью каждого слоя мата ЭВТИ, всего 11 слоев;

3) десять слоев мата ЭВТИ (каптон) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 40$  мкм;

4) тонкий прокладочный материал (кварцевое волокно) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 10$  мкм располагается между каждым слоем мата ЭВТИ.

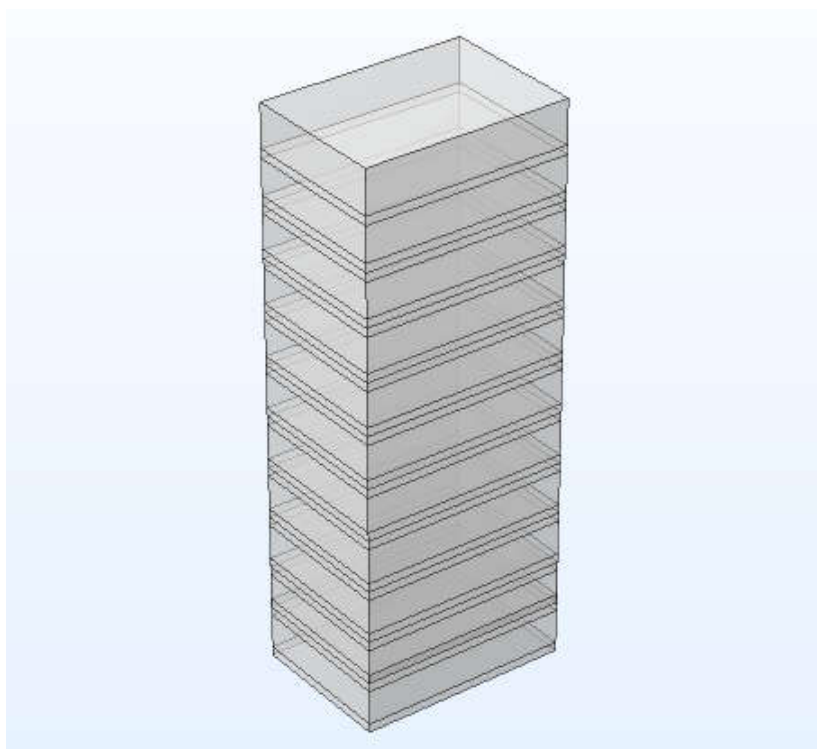


Рисунок 15 – Вид модели 1

Модель 2 – ЭВТИ при наличии воздушного зазора только между облицовочным слоем и первым экраном (рисунок 16):

1) облицовочный слой (кевлар) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 50$  мкм;

2) воздушный зазор между облицовочным слоем и первым слоем мата ЭВТИ – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 30$  мкм (второй блок на рисунке 16);

3) тонкий металлизированный слой (алюминий) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 10$  мкм располагается над поверхностью каждого слоя мата ЭВТИ, всего 11 слоев;

4) десять слоев мата ЭВТИ (каптон) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 40$  мкм;

5) тонкий прокладочный материал (кварцевое волокно) – в виде параллелепипеда с размерами  $240 \times 170 \times 10$  мкм располагается между каждым слоем мата ЭВТИ.

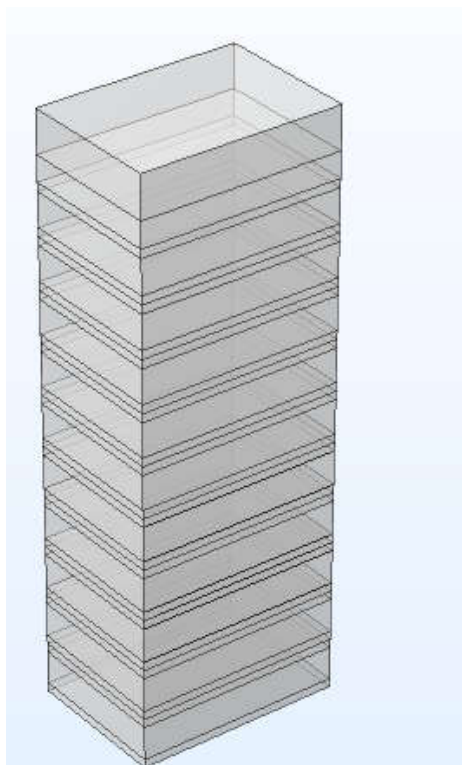


Рисунок 16 – Вид модели 2

Модель 3 – ЭВТИ при наличии воздушных зазоров между экранами.

Геометрическое построение данной модели аналогично модели 2. Между всеми экранами ЭВТИ есть воздушные зазоры – тонкие слои в виде параллелепипедов с размерами  $240 \times 170 \times 10$  мкм.

Материалы с необходимыми для расчета терморadiационными (степень черноты  $\epsilon$ ; коэффициент термического сопротивления  $k$ ; плотность материала  $\rho$ ; коэффициент теплопроводности при постоянном давлении  $C_p$ ) и оптическими характеристиками (коэффициенты отражения  $R$ , пропускания  $D$ ,

поглощения А) выбирались в подузле *Materials* с помощью встроенной библиотеки материалов COMSOL.

В интерфейсе *Heat Transfer in Solids* основное дифференциальное уравнение теплообмена имеет вид, представленный на рисунке 17. Данное уравнение учитывает наличие внешнего источника тепла, в качестве которого выступает солнечное излучение, действующее на внешнюю поверхность исследуемой модели. А также контактный теплообмен (теплопроводность) между слоями модели. Конвективная составляющая теплообмена в исследуемой модели не задавалась.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q$$

Нестационарный член
Конвекция
Теплопроводность

Уравнение Фурье
Внешний источник тепла

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Уравнение Фурье

Рисунок 17 – Основное уравнение теплообмена в интерфейсе *Heat Transfer in Solids*

Поскольку любое нагретое тело излучает тепловую энергию, то условие теплообмена на внешней поверхности исследуемой модели, излучающей тепловой поток также должно быть учтено. Для этого используется мультифизическая связка двух интерфейсов – *Multiphysics - Heat Transfer with Surface to Surface Radiation*.

В интерфейсе *Surface-to-Surface Radiation* основные уравнения излучения энергии с поверхности при наличии внешнего источника имеет вид, представленный на рисунке 18.

В интерфейсе *Heat Transfer in Solids*, который позволяет решить уравнение теплообмена в пределах расчетного домена задавались начальные и граничные условия (рисунок 19). В подузле *Thermal Insulation* установлено

условие теплоизоляции по всем боковым поверхностям от верхнего до нижнего блоков. В *Temperature* установлена температура на нижней поверхности последнего блока  $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\begin{aligned}
 J_i &= \varepsilon_i e_b(T) \text{FEP}_i(T) + \rho_{d,i} G_i \\
 G_i &= G_{m,i} + G_{\text{amb},i} + G_{\text{ext},i} \\
 G_{\text{amb},i} &= F_{\text{amb},i} \varepsilon_{\text{amb}} e_b(T_{\text{amb}}) \text{FEP}_i(T_{\text{amb}}) \\
 e_b(T) &= \pi^2 \sigma T^4 \\
 \text{FEP}_i(T) &= \frac{15}{\pi^4} \int_{c_2/(\lambda_i - 1T)}^{c_2/(\lambda_i T)} \frac{x^3}{1 - e^{-x}} dx
 \end{aligned}$$

Рисунок 18 – Основные уравнения излучения энергии в интерфейсе *Surface-to-Surface Radiation*

Интерфейс *Surface-to-Surface Radiation* связан с внешними границами образца и определяет плотность теплового потока, проникающего в материал и излучаемого в окружающее пространство. В данном интерфейсе также задавали начальные и граничные условия (рисунок 19).

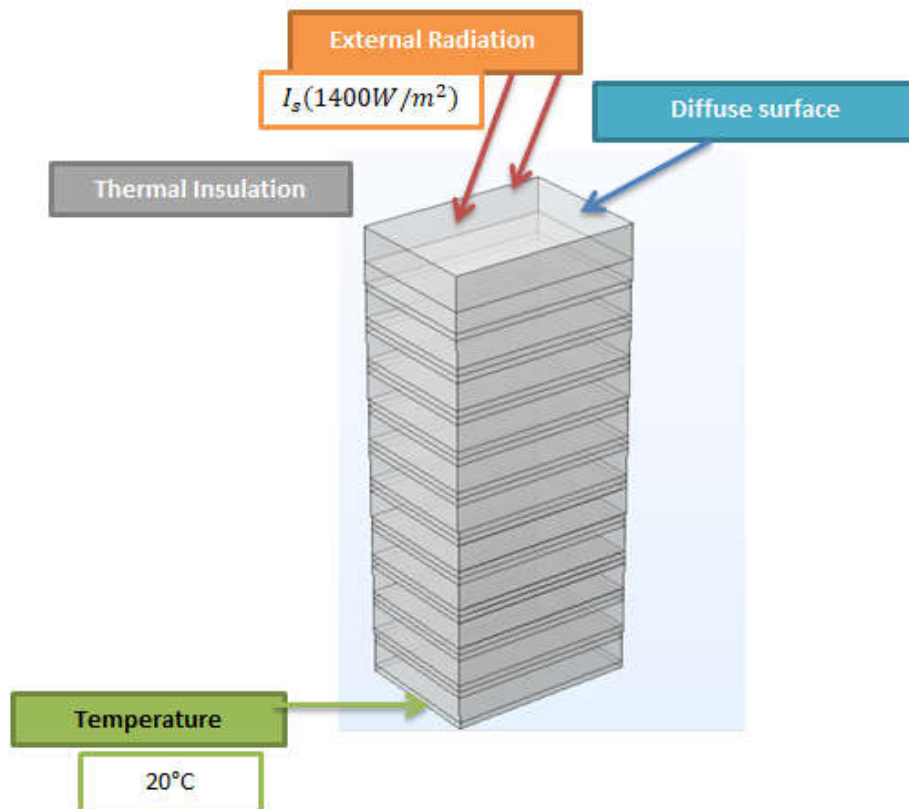


Рисунок 19 – Граничные и начальные условия для моделируемой модели

С помощью подузла *Diffuse Surface* задали постоянную степень черноты на поверхности образца. Чтобы задать функциональную зависимость степени черноты в нескольких спектральных диапазонах, изменили настройку *Radiation* и указали границы диапазона длин волн. *External Radiation Source* – подузел, с помощью которого учитывается внешний источник тепла. Эта функция позволяет задать значение плотности теплового солнечного потока падающего на исследуемую поверхность –  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Таким образом, температура, рассчитанная в интерфейсе *Heat Transfer in Solids*, задает условие на поверхности, а плотность теплового потока, рассчитанная с помощью интерфейса *Surface-to-Surface Radiation*, используется для постановки граничных условий в интерфейсе *Heat Transfer in Solids*.

Следующий этап моделирования – задание расчетной сетки, представленной в виде тетраэдров для решения дифференциальных уравнений в математической модели методом конечных элементов.

И последний этап – задать настройки решателя, а именно задать временной интервал в течении которого происходит моделирование (от 10.00 до 16.00 часов с шагом вывода результата 10 мин) (рисунок 20).

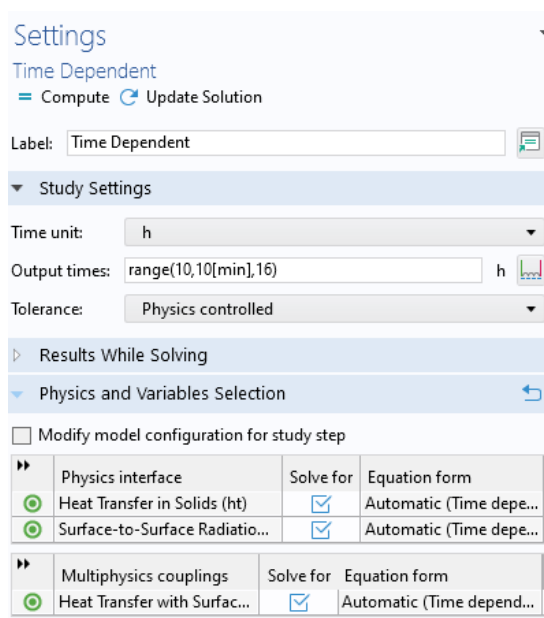


Рисунок 20 – Временной интервал моделирования



### 3.2 Результаты моделирования процесса теплообмена в исследуемых моделях

Таким образом, решение уравнений теплообмена (с учетом контактного теплообмена между слоями) и излучения энергии в интерфейсах *Heat Transfer in Solids* и *Surface-to-Surface Radiation* в их мультифизической связке программы COMSOL MultiPhysics позволило получить температурный профиль исследуемых моделей.

На рисунке 21 представлен полученный температурный профиль ЭВТИ при отсутствии воздушных зазоров между экранами – модель 1. Температурный профиль показывает распределение температуры от облицовочного слоя, внешняя поверхность которого подвергается воздействию солнечного теплового потока, до последнего экрана мата ЭВТИ. Температура последнего экрана должна соответствовать температуре защищаемой поверхности ( $20\pm 5$ ) °С.

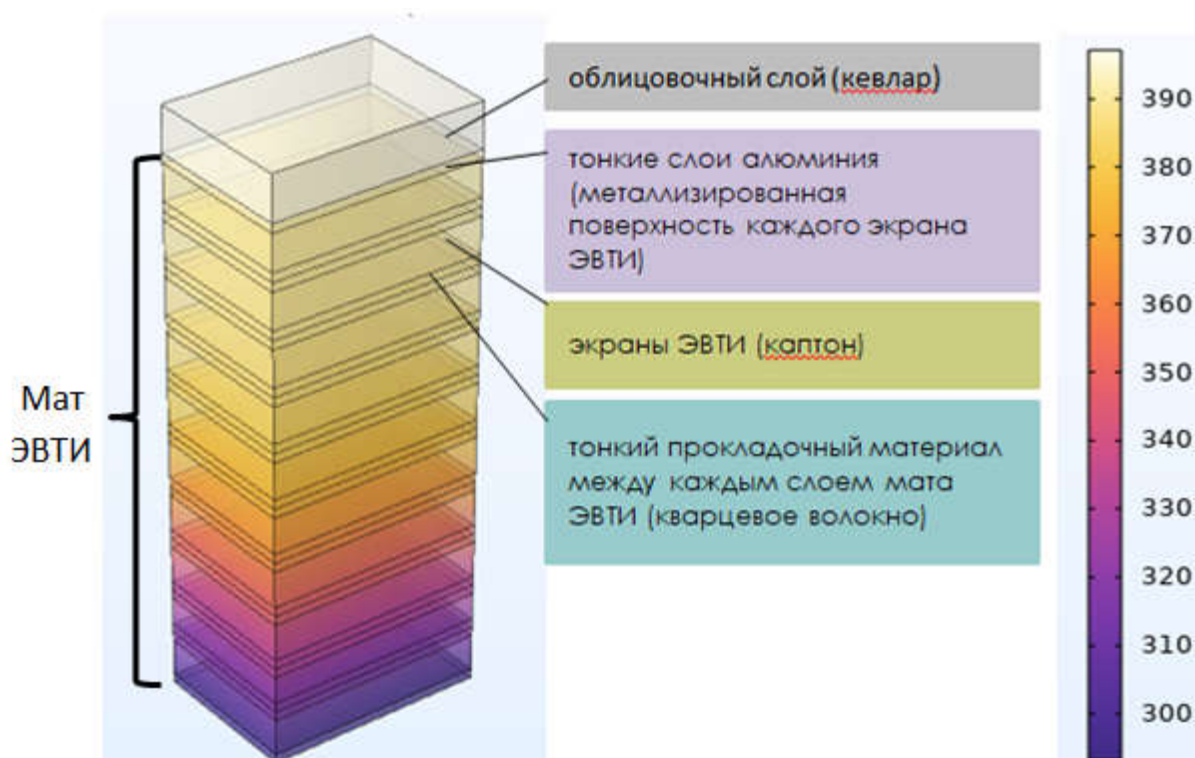


Рисунок 21 – Температурный профиль ЭВТИ модель 1

По полученной из модели температурам экранов мата ЭВТИ (первого и последнего) произвели вычисление определяющих параметров эффективности

ЭВТИ – удельное термическое сопротивление по формуле (6) и результирующий тепловой поток, проникающий через ЭВТИ, по формуле (4). Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Рабочие параметры ЭВТИ

Рабочие параметры ЭВТИ	ЭВТИ при отсутствии воздушных зазоров между экранами	Экспериментальные данные
Температура первого слоя мата ЭВТИ $T$ , °С	108	106 [7]
Результирующий тепловой поток через ЭВТИ $q_{рез}$ , Вт/м <sup>2</sup>	2,3	1,17 [7]
Удельное термическое сопротивление $R_{уд}^э$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	38,3	от 30 до 250 [1]

Видно, что полученные результаты моделирования близки к экспериментальным данным работы [7]. Температура первого экрана мата ЭВТИ (при данной его конструкции) близка к нижнему пределу рабочей температуры этого экрана (от 110 °С до 115 °С). Значение удельного термического сопротивления, полученного из модели, также согласуется с экспериментальными значениями находящимися для ЭВТИ по данным работы [1] в пределах от 30 до 250 (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Для устранения перегрева экраны ЭВТИ перфорируют. Рифление поверхности экранов приводит к образованию микронеровностей, в которых могут оставаться газонаполненные участки. Так, например, такой воздушный зазор остается между облицовочным слоем (поскольку он не перфорируется) и первым экраном. Потому был рассмотрен процесс теплообмена в модели ЭВТИ при наличии воздушного зазора только между облицовочным слоем и первым

экраном – модель 2 (рисунок 22). Между остальными экранами в данной модели воздушные слои отсутствовали.

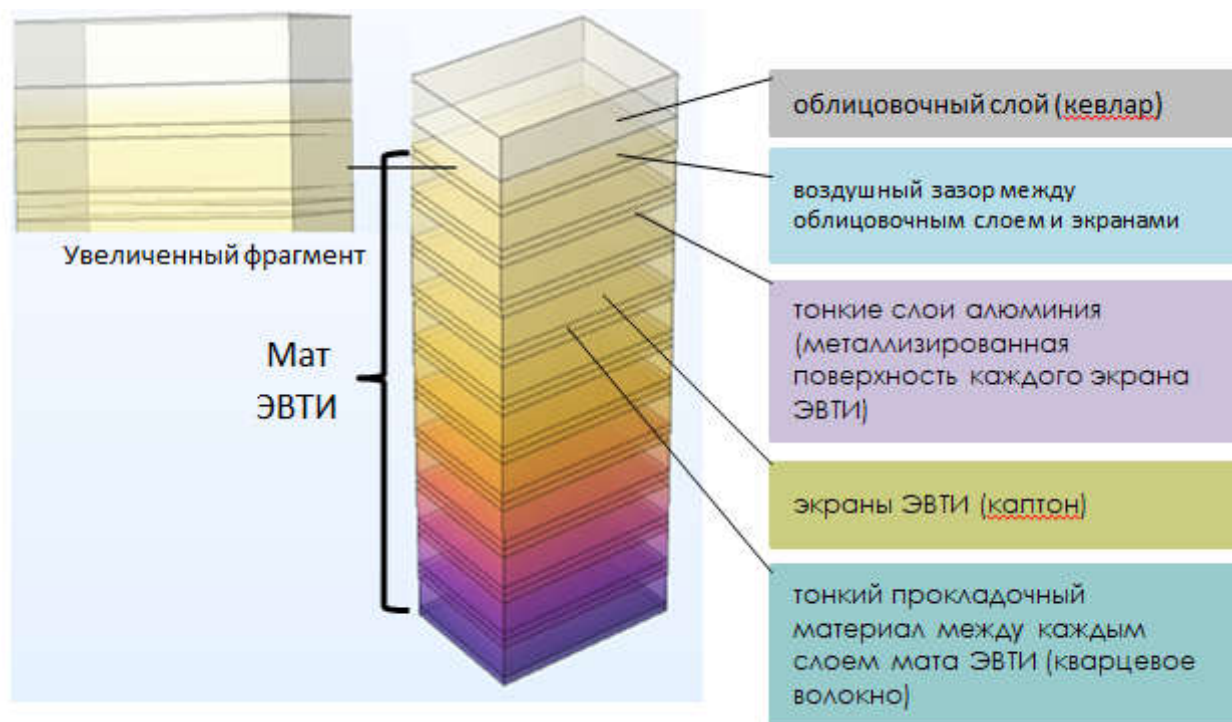


Рисунок 22 – Температурный профиль ЭВТИ модель 2

Из полученного температурного профиля температура первого экрана равна 120 °С. Таким образом, наличие воздушного зазора между облицовочным слоем и первым слоем мата ЭВТИ приводит к возникновению «парникового» эффекта. Что вызывает превышение температуры первого экрана мата ЭВТИ над допустимым значением в интервале рабочих температур экрана и при длительной эксплуатации приведет к его разрушению.

На рисунке 23 представлен температурный профиль исследуемой ЭВТИ модель 3 при наличии воздушных зазоров между экранами. Толщина воздушных зазоров при моделировании принималась равной 10 мкм. По результатам моделирования видно, что наличие воздушных зазоров между экранами приводит к перегреву первого экрана на 35 °С выше верхней границы его рабочего диапазона температур. Этот перегрев при данном подборе материалов и конструкции ЭВТИ распространяется вплоть до шестого экрана.

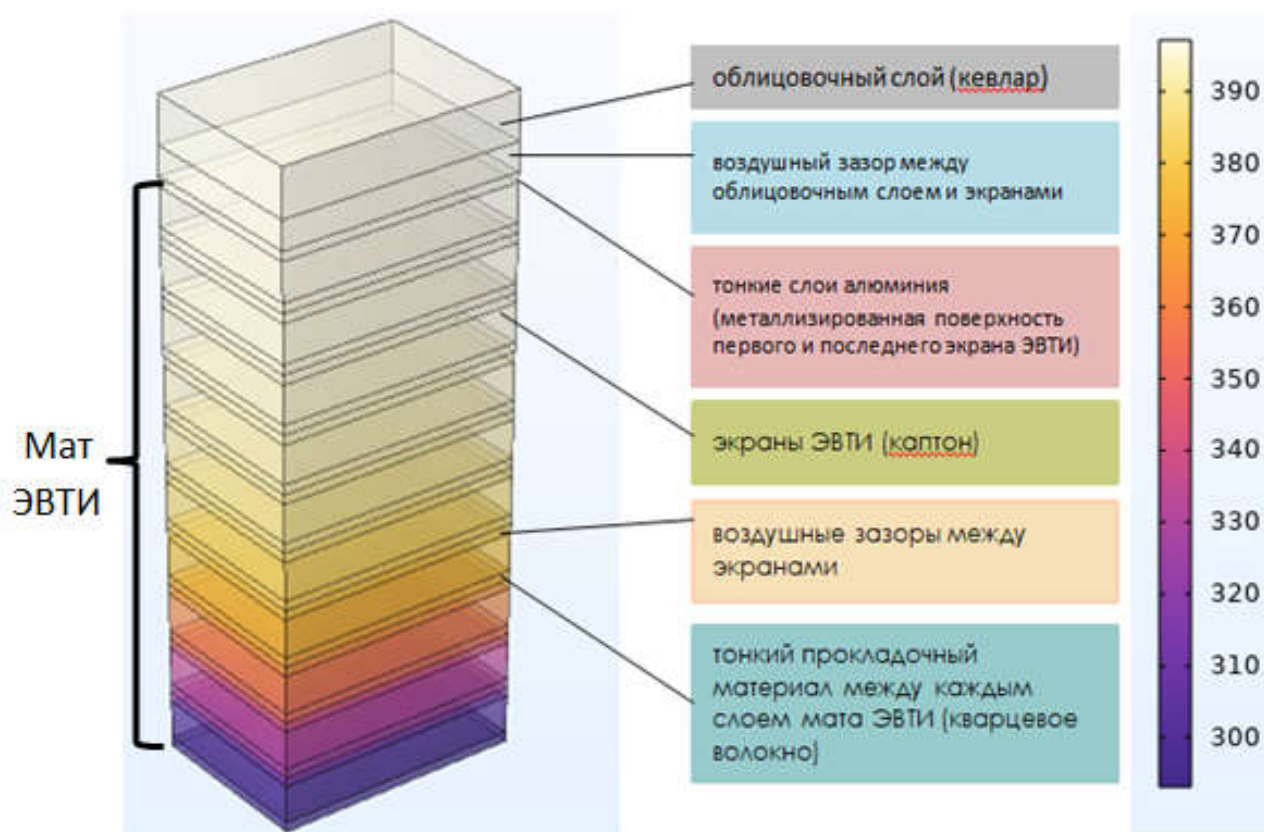


Рисунок 23 – Температурный профиль ЭВТИ модель 3

Представленная модель позволяет определить до какого экрана будет происходить перегрев (при прочих неизменных условиях) при условии, что между экранами будут сохраняться воздушные зазоры.

Важно значение при разработке ЭВТИ имеет подбор материалов экранов, облицовочного слоя, разделительных слоев, количество экранов и их толщины для обеспечения заданных предельных значений на допустимые радиационные и тепловые потоки к КА.

Средства пакета COMSOL MultyPhysics позволяют подобрать подходящие материалы для конструкции ЭВТИ, смоделировать одновременный процесс теплообмена несколькими видами и дать предварительную оценку эффективности конструкции ЭВТИ без прямого измерения теплофизических характеристик. При соответствующей доработке можно смоделировать теснение экранов, технологические стыки матов ЭВТИ, клапанов различного назначения. Что позволит более точно просчитать значение термического сопротивления ЭВТИ и его эффективность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для ЭВТИ, применяемых в определенных эксплуатационных условиях, требуется определенное сочетание материалов экранов мата ЭВТИ, облицовочных и разделительных слоев. При этом не всегда возможно прямое измерение терморadiационных характеристик конструкций ЭВТИ. Для расчета параметров эффективности ЭВТИ и предварительной оценки ее работоспособности необходимо знание значения температуры первого экрана мата ЭВТИ.

Разработанная модель процесса теплопередачи с помощью интерфейсов COMSOL Myltiphysics *Heat Transfer in Solids* и *Surface to Surface Radiation* в их мультифизической связке позволяет получить температурный профиль экранно-вакуумной теплоизоляции космического аппарата. Модель теплопередачи в ЭВТИ, состоящего из внешнего облицовочного слоя и экранов мата ЭВТИ, разделенных разделительными кварцевыми слоями, реализована при наличии внешнего теплового источника, воздействующего облицовочный слой. При данной конструкции ЭВТИ температура первого экрана мата ЭВТИ близка к нижнему пределу рабочей температуры этого слоя и согласуется с экспериментальным значением.

Из полученного температурного профиля исследуемой модели определена температура первого экрана мата ЭВТИ, необходимая для вычисления коэффициента удельного термического сопротивления и результирующего теплового потока через ЭВТИ. Проведено сравнение полученных из модели результатов и рассчитанных на их основании параметров эффективности ЭВТИ с известными экспериментальными данными. Показано, что полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Средства пакета COMSOL MultyPhysics позволяют подобрать подходящие материалы для конструкции ЭВТИ, смоделировать одновременный процесс теплопередачи несколькими видами и дать

предварительную оценку эффективности конструкции ЭВТИ без прямого измерения теплофизических характеристик.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Атамасов, В.Д. Система обеспечения теплового режима космического аппарата [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Д. Атамасов, С.И. Королев, Л.И. Калягин, ИИ. Деменьтьев. – СПб: Балт. гос. тех. ун-т, 2017. – 104 с. – Режим доступа: <https://reader.lanbook.com/book/121867#3> – 06.05.2023.

2 Семкин, Н.Д. Испытания материалов и элементов электронного оборудования космических аппаратов [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ Н.Д. Семкин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 320 с. – Режим доступа: [https://ssau.ru/files/education/uch\\_posob/Испытания%20материалов-Семкин %20НД.pdf](https://ssau.ru/files/education/uch_posob/Испытания%20материалов-Семкин%20НД.pdf). – 25.01.2022.

3 Козлов, Л.В. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей среды [Электронный ресурс] / Л.В. Козлов, М.Д. Нусинов, Г.И. Петров. М.: Машиностроение, 1971. – 382 с. – Режим доступа: [https://vtome.ru/knigi/tehnicheskie\\_nauki/383983-modelirovanie-teplovyyh-rezhimov-kosmicheskogo-apparata-i-okruzhajuschej-ego-sredy.html](https://vtome.ru/knigi/tehnicheskie_nauki/383983-modelirovanie-teplovyyh-rezhimov-kosmicheskogo-apparata-i-okruzhajuschej-ego-sredy.html). – 25.01.2022.

4 Салосина, М.О. Оптимизация многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда [Электронный ресурс] / М.О. Салосина; Москва, 2018. – 317 с. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-mnogosloynogo-teplozaschitnogo-ekrana-solnechnogo-zonda>. – 06.05.2023.

5 Сенченков, В.С. Тепловая защита систем летательного аппарата с помощью ЭВТИ. Анализ тепловых характеристик [Электронный ресурс] / В.С. Сенченко; Москва, Современные инновации. – 2016. – 208 с. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovaya-zaschita-sistem-letatel'nogo-apparata-s-pomoschyu-evti-analiz-teplovyyh-harakteristik>. – 07.05.2023.

6 Мануйлов, К. К. Исследование теплофизических и механических характеристик композитных материалов экранно-вакуумной теплоизоляции // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. – №53. – 16 с. Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-53>. – 08.05.2023.

7 Пат. 2397926 Российской Федерации МПК В64G 1/58, 2006.01. Экранно-вакуумная теплоизоляция космического аппарата с внешним комбинированным покрытием [Электронный ресурс] / В.Ф. Аристов; ООО «Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов» – № 2008125256/11; Заявл. 24.06.2008; Опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2397926C2/ru>. – 10.05.2023.

8 Танасиенко, Ф.И. Математическое моделирование жидкостных систем терморегулирования перспективных космических аппаратов [Электронный ресурс]: дис. на соискание канд. физ.- мат. наук: 01.04.14 / Ф.И. Танасиенко; Сиб. гос. ун-т. науки и технологии им. академ. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 157 с. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/matematiceskoe-modelirovanie-zhidkostnykh-sistem-termoregulirovaniya-perspektivnykh-kosmich>. – 25.09.2022.

9 Матвеев, Н.К. Экранно-вакуумная теплоизоляция и определение ее характеристик: учебное пособие [Электронный ресурс] / Н.К. Матвеев; СПб. – Балт. гос. тех. ун-т., 2012. – 40 с. – Режим доступа: [elibrary.ru/item.asp?id=19647004](http://elibrary.ru/item.asp?id=19647004). – 07.05.2023.

10 Котовский, В.Н. Теплопередача: конспект лекций [Электронный ресурс] / В. Н. Котовский. – Москва: МГТУ ГА, 2015. – 76 с. – Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12320>. – 07.05.2023.

11 Юртаев, Е.В. Упрощенная тепловая математическая модель многослойной экранно-вакуумной тепловой изоляции [Электронный ресурс] / Е.В. Юртаев, А.В. Убиенных, А.П. Колесников // Решетневские чтения. Мат. XVIII междунар. науч. конфер. – Красноярск: СГАУ им. академ. М.Ф. Решетнева, 2014. – С 117-118. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/uproschennaya-teplovaya-matematicheskaya-model-mnogosloynoy-ekranno-vakuumnoy-teplovoy-izolyatsii>. – 07.05.2023.

12 Цаплин, С. В. Основы теплообмена космических аппаратов [Электронный ресурс] / С.В. Цаплин, С. А. Большев, А. Е. Романов. – Самара:



Изд-во «Самарский университет», 2013. – 290 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38223153>. – 10.10.2022.

13 Крайнова, И. В. Разработка и идентификация математических моделей теплопереноса в экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов [Электронный ресурс]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / И.В. Крайнова; МАИ. – Москва, 2015. – 90 с. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-identifikatsiya-matematicheskikh-modelei-teploperenosa-v-ekrano-vakuumnoi-teplo>. – 15.10.2022.

14 Основы проектирования космических систем и аппаратов. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине в части проектирования системы терморегулирования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / сост. В. Е. Чеботарев [и др.]. – Красноярск: СФУ, 2018. – 60 с. – Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/fulltext?id=BOOK1-629/%D0%9E-753-328632887&start=http%3A//Lib3.sfukras.ru/ft/LIB2/ELIB/u629/i-328632887.pdf>. – 10.05.2023.

15 Формалев, В.Ф. Оптимальный выбор параметров экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов [Электронный ресурс] / В.Ф. Формалев, С.А. Колесник, И.А. Селин, Е.Л. Кузнецов; – М.: МАИ, 2017. – 114с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28880945>. – 10.05.2023.

16 Курушин, А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL [Электронный ресурс] / А.А. Курушин.– М.: «One-Book», 2016. – 376 с. — Режим доступа: [https://kurushin.ucoz.ru/\\_ld/0/36\\_COMSOL\\_\\_1](https://kurushin.ucoz.ru/_ld/0/36_COMSOL__1). – 14.05.2023.

17 Comsol.ru [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – 01.09.1998. – Режим доступа: [www.comsol.ru/support/knowledgebase/](http://www.comsol.ru/support/knowledgebase/). – 10.10.2022.

18 Wikipedia [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – 01.01.2001. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>. – 10.05.2023.

19 Солдусова, Е.А. Основные сведения о программном комплексе ANSYS. Геометрическое моделирование [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / Е.А. Солдусова .– Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2010. – 54 с. – Режим

доступа: [http://meh.samgtu.ru/sites/meh.samgtu.ru/files/soldusova\\_osnovnye\\_svedeniya\\_ob\\_ansys\\_.pdf](http://meh.samgtu.ru/sites/meh.samgtu.ru/files/soldusova_osnovnye_svedeniya_ob_ansys_.pdf). – 10.05.2023.

20 Зуев, В.С. Преимущество и недостатки специализированных пакетов в образовательном процессе / В.С. Зуев, Н.А. Гасратова, Н.С. Шимакова // Бюллетень науки и практики. – 2018. – Т.4. – №5. – С. 31-36. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-spetsializirovannyh-paketov-v-obrazovatelnom-protsesse>. – 10.05.2023.