

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Моделирование термического воздействия при технологическом процессе изготовления технической керамики</b>

УДК 666.63:536.45.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5Б2Б</b>	<b>Цуркан Татьяна Юрьевна</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Борисов Б.В.	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
Кузнецов Г.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
<b>5Б2Б</b>	<b>Цуркан Татьяна Юрьевна</b>

Тема работы:

**Моделирование термического воздействия при  
технологическом процессе изготовления технической  
керамики**

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.16

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Объект исследования – процесс термообработки исходного материала.

Предмет исследования – моделирование термообработки керамической заготовки для определения теплового режима

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор и анализ литературы и научных публикаций по направлению исследования физических процессов в керамических заготовках.          Формулирование математической модели и выбор метода ее численной реализации.          Верификация программы          Проведение численного моделирования.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>20 слайдов</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>26.02.2016</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Борисов Б.В.	д.ф.-м.н		26.02.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Цуркан Татьяна Юрьевна		26.02.2016

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 59 с., 29 рис., 16 табл., 45 источников литературы, приложения отсутствуют.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплопроводность, керамика, нагрев, трещины, температурный градиент.

Объектом исследования является процесс термообработки исходного материала

Цель работы – исследование режимов нагрева керамической заготовки с целью выявления максимальных градиентов температур, ведущих к образованию трещин в изделии.

В результате исследования разработаны режимы нагрева керамической заготовки, были получены распределения температур и температурных градиентов по поверхности заготовки.

Основные технологические характеристики: программные реализации моделирования процесса теплопроводности в геометрии сложной формы, выполненные в программном пакете Comsol Multiphysics.

Область применения: модифицирование процесса изготовления технической керамики при спекании в режиме, с наименее вероятным появлением трещин в заготовке.

Экономическая значимость работы заключается в модификации процесса производства керамических изделий путем внедрения численного моделирования для исследования теплофизических процессов. Это позволит сократить ресурсы на экспериментальное исследование процессов спекания.

Оглавление	
Введение.....	6
ГЛАВА 1. КЕРАМИКА. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА.....	8
1.1. Сведения о керамических материалах .....	8
1.2. Теплофизические свойства технической керамики.....	9
1.3. Процессы производства керамических изделий .....	12
Вывод по первой главе .....	15
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ.....	15
2.1. Использование программного пакета Comsol Multiphysics для моделирования задач нестационарной теплопроводности.....	15
2.2. Верификация программных расчетов.....	16
Вывод по второй главе.....	20
Глава 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ.....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
3.1. Выбор реального объекта.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2. Моделирование с анализом результатов .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.3. Формулирование основных результатов исследования .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	22
4.1. Календарный план-график выполнения НИР.....	22
4.2. Бюджетный план экспериментального исследования .....	24
4.3. Сравнительная оценка программных продуктов.....	26
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.1 Анализ проявления вредных факторов среды .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.2. Анализ проявления опасных факторов среды...	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.3. Охрана окружающей среды.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4. Защита в чрезвычайных ситуациях .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

5.5. Законодательное регулирование организационных работ.....**Ошибка! Закладка не определена.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

## ВВЕДЕНИЕ

В результате интенсификация рабочих процессов отраслей промышленности (радиоэлектроники, атомной, авиационной, ракетной техники и других) к конструкционным материалам предъявляются требования, связанные с повышением их эксплуатационных свойств. Возникают задачи в создании новых конструкционных материалов повышенной механической прочности, огнеупорности, термической устойчивости и других свойств. К примеру, в авиационных газотурбинных двигателях значительно повышаются требования по теплостойкости, надежности и сроку службы основных конструкционных элементов двигателя. Эти элементы подвергаются большим тепловым нагрузкам, работая при больших переменных силовых нагрузках в окислительной среде. [1] На смену традиционным материалам, применяемыми в промышленности, приходит техническая керамика. Этот материал обладает высокой коррозионной устойчивостью, термостойкостью, механической прочностью. [2]. Из всего разнообразия керамических изделий можно выделить керамику из оксида алюминия за счет того, что является одним из перспективных керамических материалов в результате своей простой доступности с одной стороны и сочетания необходимых конструкционных, механических и других свойств [3-5]. Перспектива развития керамики состоит в том, что из-за многообразия своих свойств, сравнивая с другими конструкционными материалами, обладает также доступностью сырья, низкой энергоемкостью изготовления, долговечностью конструкций, особенно при работе в агрессивных средах. К тому же производство технической керамики, не загрязняет окружающую среду так, как, например, металлургия. Еще

немаловажной перспективой таких материалов является их биологическая совместимость, чем у металлов или полимеров, что позволяет использование керамики в медицине, как для имплантации искусственных органов, так и в качестве конструкционных материалов в биотехнологии и генной инженерии [6,7]

### **Актуальность работы**

В настоящее время активно изучают различные типы керамики, ее свойства, изменение ее структуры и размер частиц в зависимости от состава порошков и процесса спекания [5-8]. Особенное внимание уделяют исследованиям в области физико-механических свойств керамики [9-11].

Применение традиционных методов спекания не всегда позволяет добиться необходимых результатов для получения качественных керамических изделий из-за медленного и неравномерного нагрева деталей, поэтому используют метод спекания порошков с использованием электроимпульсных плазменных установок или вакуумное спекание [12-16]. При этом необходимо обеспечить такой температурной режим, который позволил бы предотвратить возможные возникновения трещин в заготовке. Применение численного исследования позволит модифицировать процесс производства керамики и сократить затраты при проведении экспериментальных методов керамики.

**Цель работы** исследование режимов нагрева керамической заготовки с целью выявления максимальных градиентов температур, ведущих к образованию трещин в изделии.

#### **Задачи исследования:**

1. Проведение обзора литературы и научных публикаций по направлению исследования физических процессов в керамических заготовках.
2. Формулирование математической модели и выбор метода ее численной реализации.

3. Создание верификация программы
4. Проведение численного моделирования.

**Объект исследования-** процесс термообработки исходного материала.

**Предмет исследования-** моделирование термообработки керамической заготовки для определения температурного режима нагрева.

## **ГЛАВА 1. КЕРАМИКА. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА.**

### **1.1. Сведения о керамических материалах**

Технической керамикой называют неметаллические, неорганические изделия, полученные из однородной смеси порошкообразных материалов с водой или другими жидкостями различными методами формования и упрочненные в процессе обжига [17].

К основным классификациям технической керамики можно отнести классификации по химическому составу и назначению [5].

Классификация по химическому составу:

1. Оксидная керамика. Данные материалы состоят из чистых оксидов  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $BeO$ ,  $ThO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $UO_2$ , оксидов редкоземельных металлов, их механических смесей ( $ZrO_2-Al_2O_3$  и др.), твердых растворов ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ,  $ZrO_2-MgO$  и др.), химических соединений (муллит  $3Al_2O_3 \times 2SiO_2$  и др.)

2. Безоксидная керамика. Этот класс составляют материалы на основе карбидов, нитридов, боридов, силицидов, фосфидов, арсенидов и халькогенидов (кроме оксидов) переходных металлов и неметаллов III–VI групп периодической системы.

Классификация керамики по назначению:

1. Строительная керамика.
2. Тонкая керамика.
3. Химически стойкая керамика.

4. Огнеупорная керамика.

5. Техническая керамика.

## 1.2. Теплофизические свойства технической керамики

К основным теплофизическими свойствами керамики можно отнести теплопроводность, теплоемкость, тепловое расширение, термическая стойкость. Рассмотрим каждый из приведенных свойств.

Теплопроводность характеризует скорость теплопереноса и определяется из закона Фурье [19]:

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|\text{grad } t|}, \frac{Вт}{м \cdot К}$$

При наличии теплообмена в теле температура будет неравномерной, поэтому применяют зависимость коэффициента от температуры:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b(t - t_0)].$$

При применении керамического изделия необходимо учитывать изменение коэффициента теплопроводности с течением изменения температуры. На рисунке 1 показано изменение теплопроводности некоторых видов керамики от температуры [17]. Как видно с увеличением температуры теплопроводность спеченной керамики кристаллического строения падает. Исключением является диоксид циркония, теплопроводность которого с повышением температуры возрастает. В работе [20] для окиси бериллия с пористостью 4,3% во всем исследуемом температурном интервале от 473К до 1373К было выявлено что происходит убывание коэффициента теплопроводности

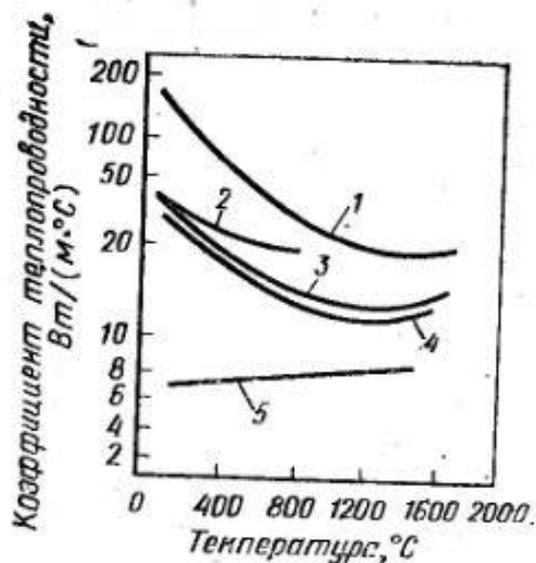


Рисунок 1- Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры  
 1-BeO плотносспекшийся; 2-SiC; 3-MgO, плотносспекшийся; 4- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> корунд; 5-  
 ZrO<sub>2</sub> стабилизированный плотносспекшийся.

Следует отметить, что теплопроводность тесно связана с пористостью. Наличие пор в керамических материалах вызывает дополнительное понижение теплопроводности как это было рассмотрено в работе [21]. При этом коэффициент теплопроводности может быть приблизительно определен по формуле [17]:

$$\lambda_0 = \lambda (1) - \Pi ,$$

где  $\lambda$  - средний коэффициент теплопроводности;

$\lambda_0$ - коэффициент теплопроводности того же тела, не содержащего пор;

$\Pi$  - объемная пористость

Теплоемкость керамики значительно меняется при низких температурах и незначительно при высоких, после 1000 °С. Это происходит потому, что теплоемкость зависит от структурных особенностей, таких как: пористость, плотность, размеры кристаллов и другие, а не от состава материала [22].

Тепловое расширение керамики происходит вследствие увеличения амплитуды колебаний ее атомов или ионов относительно их среднего положения, происходящих под влиянием температуры. Коэффициент линейного расширения керамики непостоянен при любой температуре и

для большинства керамических материалов он увеличивается с повышением температуры (рис.2) [17].

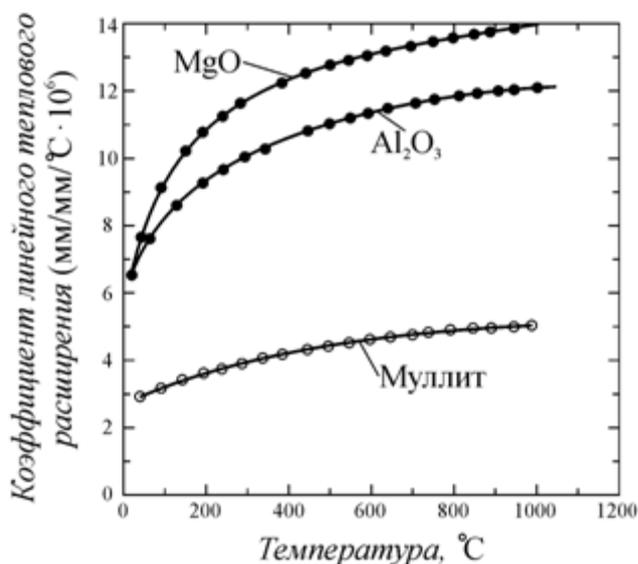


Рисунок 2- Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры для некоторых видов керамики

Термическое расширение большинства монокристаллов анизотропно, в кристаллах с кубической решеткой такое расширение происходит равномерно по всем направлениям, как это было выявлено в работе [24]. Тем не менее для широко распространенного корунда  $Al_2O_3$  наблюдается анизотропия. Несимметричное строение кристаллической решетки может послужить тем, коэффициент линейного расширения будет отрицательным в одном из направлений. Впервые тепловое расширение корунда исследовал Физо (1865 г.). В дальнейшем были предприняты попытки исследовать различные разновидности окиси алюминия и расширить температурные пределы исследования. Существующие результаты исследования теплового расширения окиси алюминия носят противоречивый характер. Одни результаты показывают изотропный характер расширения [25,26], другие исследователи [27] обнаружили анизотропию теплового расширения порядка 8—10%. Но так как керамика представляет собой поликристаллические тела с хаотическим расположением элементарных кристаллов материалы являются практически изотропными.

Следующим важным свойством, которым обладает техническая керамика является термическая стойкость, которая характеризует способность керамического изделия выдерживать резкие изменения температуры без разрушения материала [28]. Разрушение керамического изделия происходит в основном под влиянием температурных напряжений. Они могут возникать из-за различной температуры в разных частях нагреваемой заготовки, разных значений коэффициента линейного расширения коэффициентов в многофазовой керамике [29].

Также следует отметить, что на прочностные свойства керамики влияют ее структура и пористость. С повышением пористости все ее прочностные характеристики снижаются вследствие концентрации напряжений вокруг пор и уменьшения контактной поверхности соприкосновения отдельных зерен. Керамика мелкозернистого строения обладает большей прочностью, чем крупнозернистая, при одном и том же фазовом и химическом составе. В работе [30] рассматриваются причины разрушения керамических изделий, было обнаружено, что еще в процессе формовки изделия могут оставаться поры, которые в дальнейшем могут стать причиной разрушения

При оценке механических свойств керамики следует иметь ввиду, что результаты измерений в значительной степени определяются методикой подготовки образца и проведения испытаний.

### **1.3. Процессы производства керамических изделий**

Керамические изделия вследствие их разнообразия изготавливают разными технологическими приемами, но основные этапы их производства являются [31]:

- добыча глины и подготовка массы для формования
- формование сырца
- сушка
- обжиг

Основное внимание в данной работе уделим процессам сушки и обжига изделия, т.к. именно процесс термообработки оказывает основное влияние на структуру свойства изделия. В работах [32-35] рассматривают режим обжига изделия по следующим основным параметрам: температуре, времени выдержки и скорости нагрева. В процессе обжига керамическая масса подвергается как химическим, так и фазовым превращениям, что определяет сложность определения оптимального режима. Для оптимизации условий термообработки, а, следовательно, структуры и отдельных свойств, необходима разработка физических моделей, учитывающих следующие аспекты. Во-первых, протекание физических процессов при обжиге с учетом нестабильности фаз при протекании внутренних реакций, пространственную и временную неоднородность теплофизических параметров системы. Во-вторых, реакцию керамического изделия при эксплуатации на термические и механические напряжения.

Основным в теории сушки являются закономерности переноса тепла и влаги во влажных материалах при взаимодействии их с нагретыми газами, горячими поверхностями, а также в процессах облучения тепловыми и электромагнитными волнами при наличии фазовых превращений. Процесс сушки является технологическим процессом, т.к. при этом процессе происходит изменение форм связи влаги с материалом и ее частичное удаление путем испарения. Закономерности кинетики процесса сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из материала и расход тепла на сушку. Кинетикой процесса сушки называют изменение среднего влагосодержания  $u$  и средней температуры  $t$  с течением времени. Нахождение полей влагосодержания  $u(x, y, z, \tau)$  и температуры  $t(x, y, z, \tau)$  связано с решением дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса при существующих граничных условиях [36]. В данной работе данный процесс не был исследован, основной целью, ставился вопрос термообработки сухой керамической заготовки.

Обжиг изделия окончательно формирует структуру материала, оказывая влияние на свойства изделия. В процессе обжига происходит спекание материала. Спеканием называется процесс упрочнения и уплотнения

спекаемого материала. При спекании происходит образование твердого и прочного материала из непрочных и несвязанных частиц, также изменяется объем и пористость спекаемого материала.

Единого режима спекания не исследовано, но основные процессы, протекающие при этом процессе, имеют теоретическое описание. При спекании происходит перенос вещества в результате чего изменяется поверхностная энергия в различных участках системы. В настоящее время теоретически обоснованы следующие виды спекания: диффузионное, жидкостное, за счет испарения и конденсации, за счет пластической деформации, реакционное [36]. В данной работе рассматривается процесс диффузионного спекания.

Механизм диффузионного спекания протекает при отсутствии жидкой фазы, также такое спекание называют твердофазовым. Такое спекание напрямую зависит от наличия дефектов в кристаллической решетке. Поверхностная энергия возрастает с увеличением наличия дефектов. Разность значений свободных энергий является движущей переноса вещества диффузией. Модель такого спекания можно представить в виде двух кристаллических частиц шарообразной формы (рис.3.). Если привести в соприкосновение эти сферы, нагреть до некоторой температуры и выдержать в таком состоянии, то через некоторое время эти сферы срастутся между собой. Перенос вещества будет происходить от контактной поверхности между частицами к поверхности образующихся перемычек.

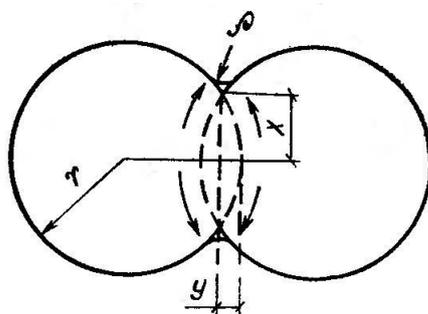


Рисунок 3- Модель диффузионного спекания

$x$ -радиус площади контакта;  $y$ -разность между диаметрами сферы и центрами сближающихся сфер;  $r$ -радиус сферы;  $\rho$ -радиус кривизны образовавшейся перемычки.

## **ВЫВОД ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ**

Из проанализированных источников литературы по основным видам и теплофизическим свойствам технической керамики были выявлены основные особенности изготовления керамических изделий. Это позволяет перейти к формулированию математической модели изготовления керамических изделий.

## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ**

### **2.1. Использование программного пакета Comsol Multiphysics для моделирования задач нестационарной теплопроводности**

Зачастую моделирование сложных физических процессов основано на применении методов численного моделирования. При решении задач численного моделирования необходим соответствующий программный продукт, который способен с достаточной точностью и эффективностью предоставить обширный круг возможностей для наиболее быстрого и качественного построения физических моделей.

Comsol Multiphysics -интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных [37].

В Comsol Multiphysics дифференциальные уравнения в частных производных решаются с помощью метода конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечно-элементный анализ вместе с сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с применением различных численных решателей.

Метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее общим и достаточно эффективным методом численного моделирования в сложных системах.

Решение задач нестационарной теплопроводности описывается уравнением:

$$\delta_{ts} \cdot \rho \cdot c_p - \nabla(k\nabla T) = Q + h(T_{ext} - T) + C(T_{amb}^4 - T^4),$$

где  $\delta_{ts}$  –временной коэффициент;  $\rho$ -плотность, кг/м<sup>3</sup> ;  $c_p$  –теплоемкость, Дж/кг·К;  $k$ -коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $T$ -начальная температура, К;  $Q$ -тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup> ;  $h$ -коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> ·К;  $T_{ext}$  –внутренняя температура, К;  $T_{amb}$  –внутренняя температура, К;  $C$ -константа.

Граничные условия задаются следующими выражениями:

I рода:  $T=T_0$

II рода:  $n(k\nabla T) = q_0$

III рода:  $n(k\nabla T) = h(T_{int} - T)$

## 2.2. Верификация программных расчетов

Для проведения исследования поставленной задачи необходимо удостовериться в правильности решения при использовании программного пакета Comsol Multiphysics. Для этого проведем расчет используя простые модели тел. Для получения достоверности необходимо убедиться, что полученные результаты совпадают с имеющимися аналитическими решениями задач теплопроводности. Верификацию будем проводить для моделей в двумерном и трехмерном режимах. В качестве геометрической модели примем плоскую пластину и куб.

### 2.2.1. Расчет нестационарной теплопроводности пластины в двумерном режиме

Область решения представляет собой плоскую пластину толщиной  $\delta=5$ см (рис.4). Теплофизические свойства области:  $\lambda=50$  Вт/м·К,  $\rho=7859$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_p=500$  Дж/кг·К.

На левой и правой границе заданы граничные условия I рода с  $T_1=273$  К и  $T_2=500$  К соответственно.

Время нагрева составляет 60 сек.

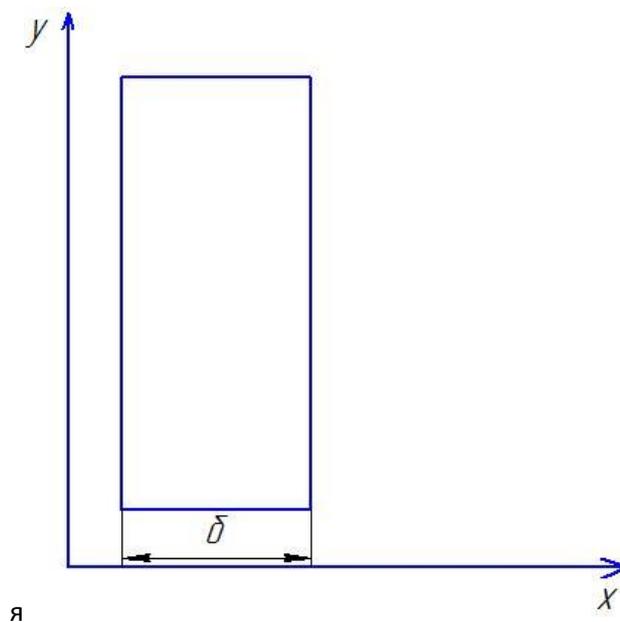


Рисунок 4- Геометрическая модель плоской пластины  
В результате расчета плоской пластины получим:

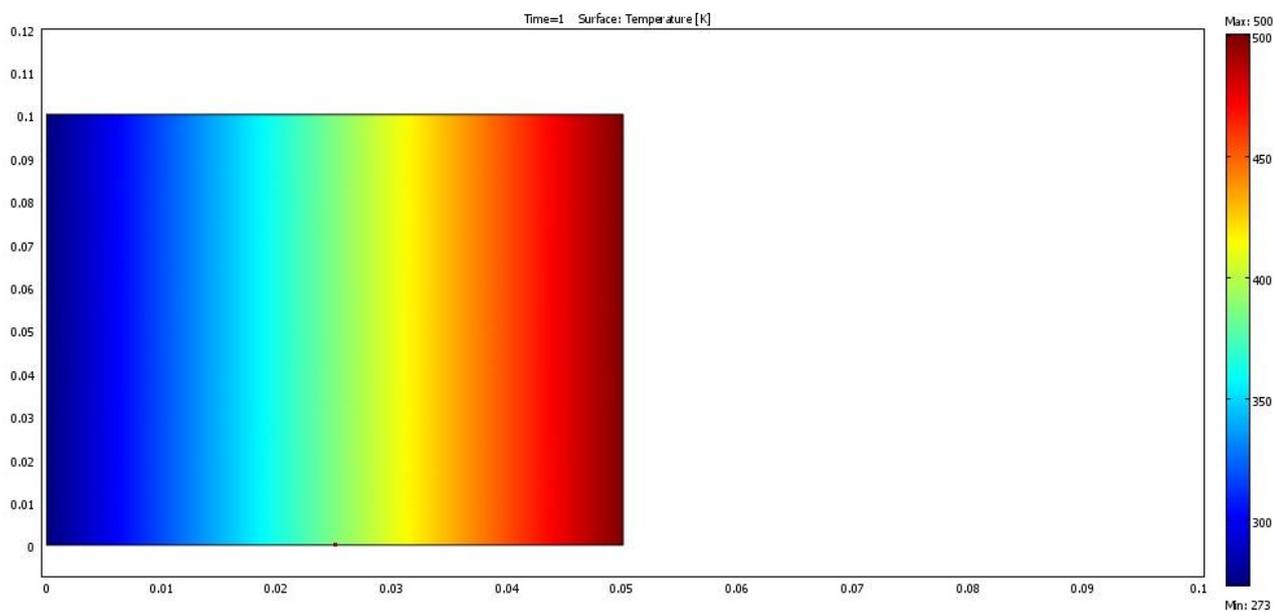


Рисунок 5- Распределение температуры по толщине пластины

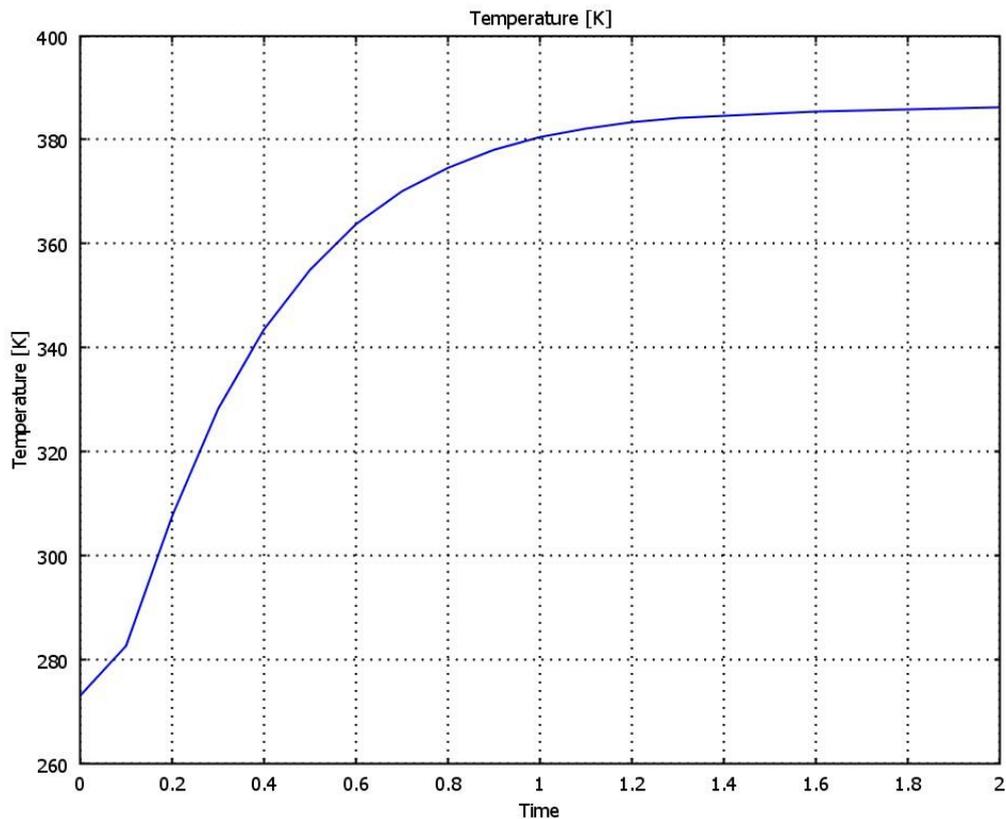


Рисунок 6- Изменение температуры со временем в точке  $x=\delta/2$

### 2.2.2. Расчет нестационарной теплопроводности куба в трехмерном режиме

Область решения представляет собой куб размером  $10 \times 10 \times 10$  (рис.7). Теплофизические свойства области:  $\lambda=50$  Вт/м·К,  $\rho=7859$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_p=500$  Дж/кг·К.

На левой грани куба заданы граничные условия II рода с  $q=1000$  Вт/м<sup>2</sup>, правая грань имеет граничные условия I рода с  $T=500$  К.

Время нагрева составляет 1800 сек.

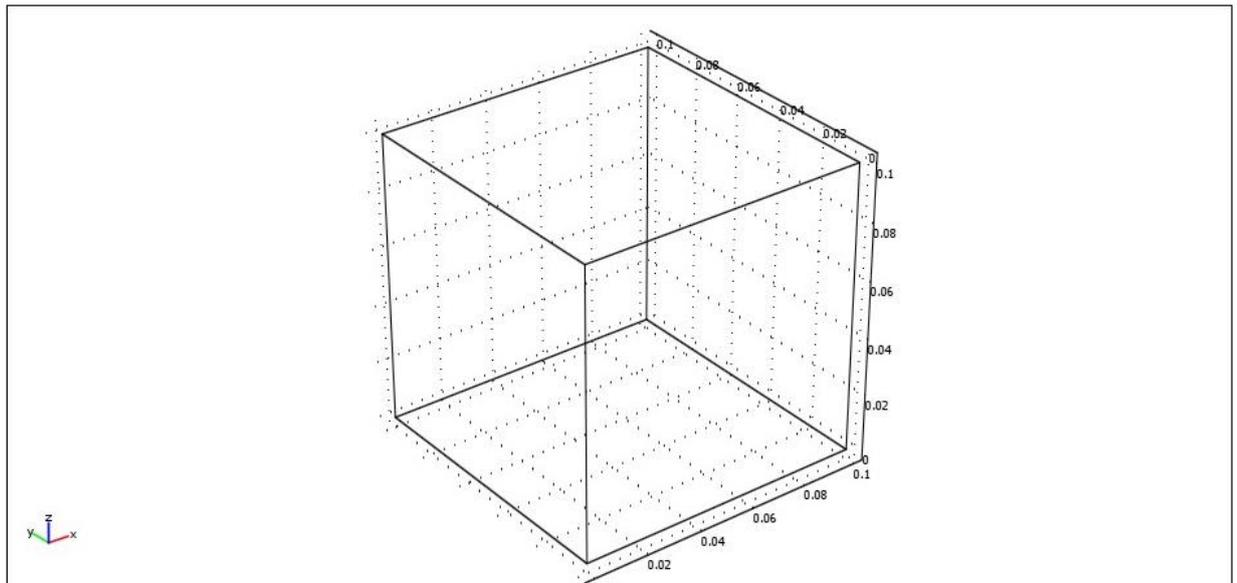


Рисунок 7-Геометрическая модель-куб

В результате расчета трехмерной модели куба получим:

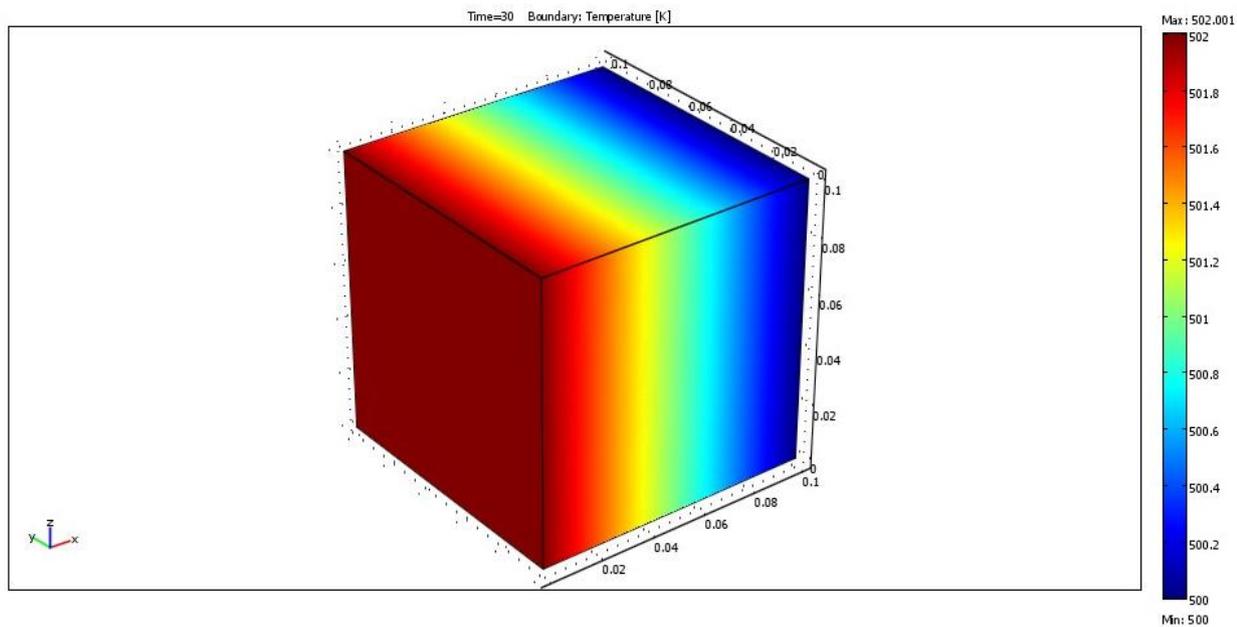


Рисунок 8- Распределение температуры по длине куба

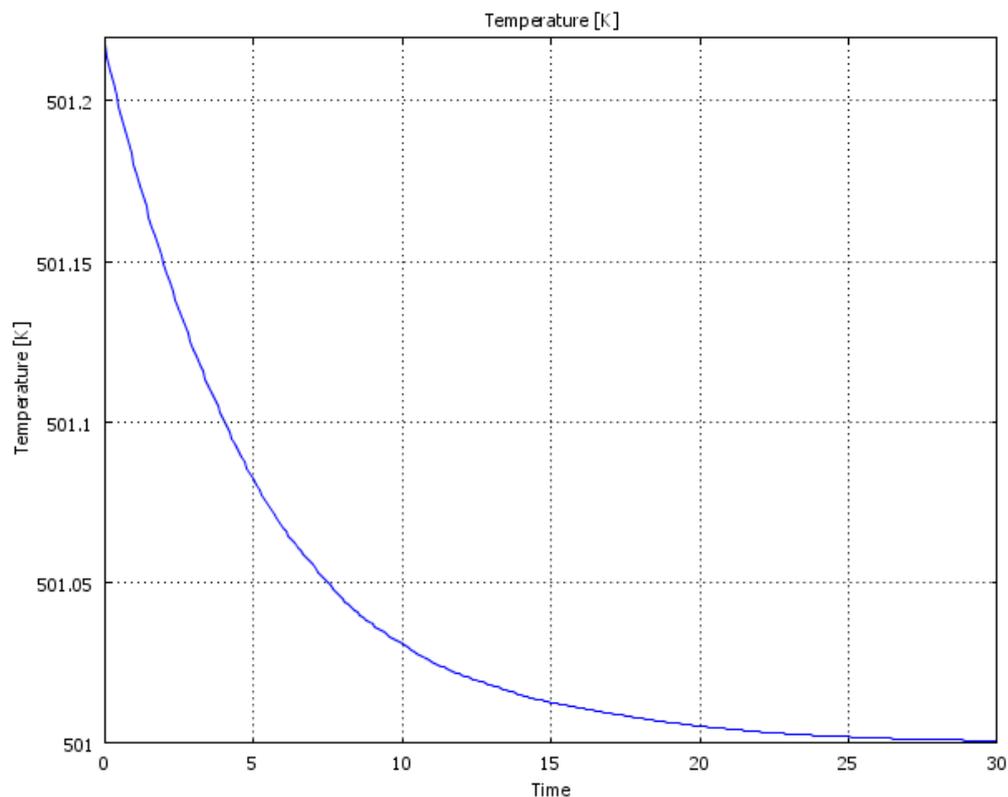


Рисунок 9- Изменение температуры в стенке со временем

## ВЫВОД ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Как видно из полученных расчетов распределение температуры по толщине пластины и длине куба имеет равномерный характер тем самым совпадает с одномерным решением. При проверке данной задачи на геометрии цилиндра и шара то получили также решение, что совпадает с одномерной задачей. Таким образом можно сделать вывод, что проверка достоверности решений закончена. Поэтому можно переходить к использованию данной методики численного моделирования на геометрической модели сложной формы.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Б2Б	Цуркан Татьяна Юрьевна

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>теоретической и промышленной теплотехники</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>бакалавриат</b>	<b>Направление</b>	13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов, амортизационные отчисления, заработная плата научного руководителя</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы амортизации</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИР с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Экспертная оценка сравнения ресурсоэффективности</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление бюджета НИР</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Анализ критериев ресурсоэффективности</i>

**Перечень графического материала ):**

1. *Календарный план*
2. *Диаграмма Ганта*

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова С. Н.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5Б2Б	Цуркан Т.Ю.		

## 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

**Тема научной работы:** Моделирование термического воздействия при технологическом процессе изготовления технической керамики.

Основной целью исследования является определение максимальных температурных градиентов в керамической заготовке. Основными направлениями исследования являются:

1. Применение экспериментальной установки с последующим измерением механических свойств.
2. Применение численного моделирования для исследования теплофизических свойств и их поведения.

Численное моделирование имеет преимущества по сравнению с экспериментальным исследованием, такие как:

- 1) Отсутствие затрат на экспериментальную установку;
- 2) Возможность быстрого изменения входных параметров;
- 3) Отсутствие опасности выхода из строя установки;

### 4.1. Календарный план-график выполнения НИР

Календарный план НИР устанавливает очередность выполнения работ в увязке со временем их исполнения. Сроки исполнения зависят от сложности операций на каждом из этапов, что отображено в таблице 4.

Таблица 4 – Календарный план выполнения НИР

№ этапа	Основные этапы выполнения НИР	Содержание каждого этапа	Срок выполнения
1	Выбор темы и технического задания для ВКР	Составление и утверждение технического задания	1 неделя
		Оформление технического задания	
2	Разработка теоретической части НИР	Обзор литературы по данной тематике	3 недели

		Описание физической модели исследования	
		Описание математической модели исследования	
3	Разработка практической части НИР	Выбор среды программирования	6 недель
		Разработка методики описания математической модели в среде программирования	
		Составление программы	
		Сбор результатов вычислений программы	
		Анализ результатов	
4	Разработка части «Финансовый менеджмент»	Описание целей, и преимуществ проекта	1 неделя
		Календарный план-график проекта	
		Бюджетный план проекта	
5	Разработка части «Социальная ответственность»	Описание рабочего места	1 неделя
		Анализ вредных и опасных факторов рабочей среды	
		Расчет искусственного освещения для рабочего помещения	

Представим графически календарный план выполнения НИР. Для этого построим диаграмму Ганта.

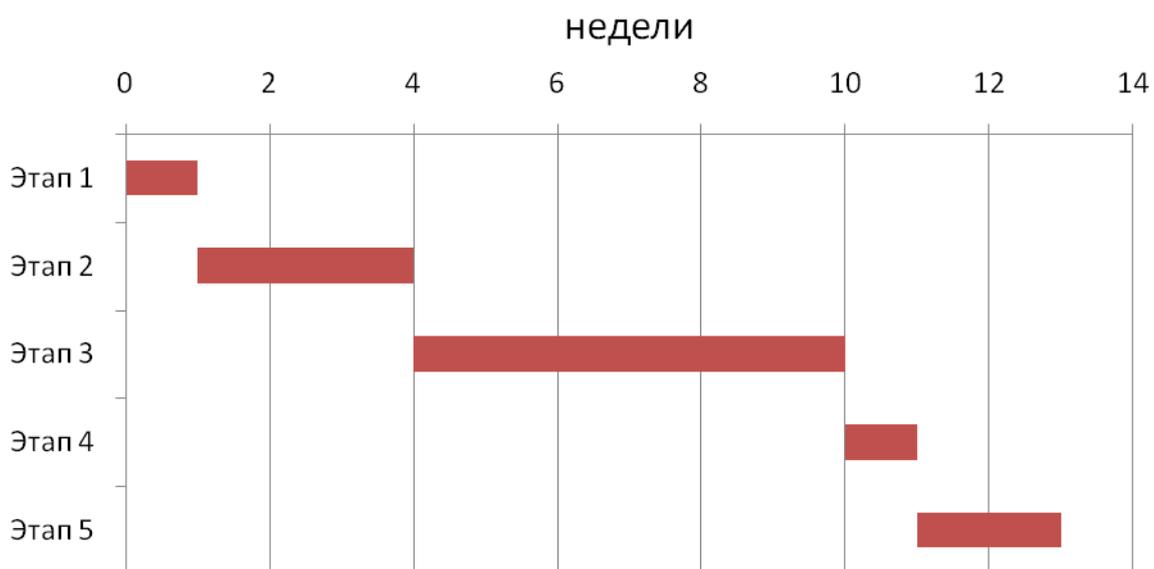


Рисунок 28 – Диаграмма Ганта по выполнению НИР

## 4.2. Бюджетный план экспериментального исследования

Исходя из стоимости на используемые в работе материалы, а также затрат на электроэнергию составляется бюджетный план проекта. Затраты на электроэнергию рассчитываются по нормам электропотребления приборов и длительности использования за период выполнения НИР.

Таблица 5– Расходы на материалы для выполнения НИР

Расходы	Ед. измерения	Цена, руб	Кол-во	Итого
Канцтовары	-	-	-	1245
Заправка картриджа	руб	500	1	500
Электроэнергия	кВт·ч	4,25	803,9	3416,6
Стоимость лицензионной версии программного пакета	руб	533986	1	533986
Экспериментальная установка	шт	15 млн	1	15000000
<b>Итого</b>				<b>15539147</b>

Таблица 6 – Потребление электроэнергии при выполнении НИР

Источник потребления	Мощность, кВт/ч	Кол-во часов	Итого
Персональный компьютер	0,2	200	40
Ноутбук	0,06	20	1,2
Освещение	0,05	54	2,7
Принтер и МФУ	0,05	2	0,1
Экспериментальная установка	152	5	760
<b>Итого</b>			<b>803,9</b>

В связи с изнашиванием оборудования в процессе выполнения работы стоит учитывать затраты на его амортизацию. Расчёт производится по следующим соотношениям:

$$\text{Норма амортизации} = (1/\text{срок службы}) \cdot 100;$$

$$\text{Величина амортизации в год} = (\text{стоимость оборудования} \cdot \text{норма амортизации}) / 100;$$

$$\text{Сумма амортизации в час} = \text{величина амортизации в год} / \text{количество часов работы в год};$$

$$\text{Стоимость амортизации} = \text{время работы} \cdot \text{сумма амортизации в час}.$$

Данные об амортизационных отчислениях сведены в таблицу 4.

Таблица 7 – Затраты на амортизацию оборудования

Объект	Норма в год	Стоимость	Величина в год	Кол-во часов	Сумма в час	Время работы, ч.	Стоимость амортизации
Персональный компьютер	20	50000	10000	1720	5,81	200	1162
Принтер и МФУ	20	8000	1600	382	4,18	2	8,36
Ноутбук	20	30000	6000	2290	2,62	20	52,4
<b>Итого</b>							<b>1222,76</b>

Зарплата и отчисление на соц. нужды:

Оплата работы руководителя ВКР (бакалавра) почасовая. Норма времени на руководство ВКР бакалавра составляет 22 часа. В соответствии с временным положением о порядке нормирования труда научно-педагогических работников, тариф на почасовую оплату работы профессора составляет 400 руб/час, а значит расходы на оплату труда определяются как:

$$C_{з.п.} = 22 \cdot 400 = 8800 \text{ руб.}$$

$$\text{Отчисления на социальные нужды } S_{с.н.} = 8800 \cdot 0,27 = 2376 \text{ руб.}$$

$$\text{Суммарные затраты составят: } C_{\text{сум.}} = 8800 + 2376 = 11176 \text{ руб.}$$

Таблица 8 – Смета проекта

Материалы	Зарплата и соц.отчисления	Амортизация	Сумма
<b>15539147</b>	11176	1222,76	15551545,7

Исследование включает в себе проведение последовательных опытов, как правило в данной работе достаточно проведение 3-5 опытов. Применение программного продукта позволит сократить расход электроэнергии на исследование за счет уменьшения работы часов установки.

### **4.3. Сравнительная оценка программных продуктов**

Для разработки качественного программного продукта, выбор языка программирования является одним из важнейших шагов. Именно от этого выбора будет зависеть качество конечного продукта, быстрота работы, актуальность листинга программы и т.д. Поэтому произведем сравнительный анализ нескольких сред моделирования.

Экспертная оценка

Формулируется задача: найти аналитическую модель аттестации языка программирования, основывающуюся на его характеристиках.

Модель экспертной оценки строится по следующим параметрам:

1. Распространенность
2. Простота написания
3. Актуальность
4. Размер программного кода
5. Простота проверки ошибок кода

Эксперты оценили характеристики товаров по 10 - ти бальной шкале (10 - *max*). Далее они оценили важность каждого критерия по 5 бальной шкале (*bj*). Все данные представлены в таблицах 10-14.

Таблица 9 – Список языка программирования

№	Язык программирования
1	ANSYS
2	Comsol
3	OpenFOAM
4	<b>MDynaMix</b>

Таблица 10 - Оценка конкурентоспособности экспертом №1

Название	Простота	Универсальность	Распространенность	Технические характеристики	Графическая интерпретация	Сумма
ANSYS	10/2,1	8/1,68	7/0,735	8/2,104	10/2,1	9,249
MDynaMix	7/1,47	7/1,47	4/0,42	8/2,104	3/0,63	6,253
OpenFOAM	5/1,05	5/1,05	2/0,21	4/1,052	2/0,42	3,888
Comsol	10/2,1	9/1,89	10/1,05	9/2,367	8/1,68	9,511
Важность ( $b_i$ ) [1-5]	4	4	2	5	4	19
Вес ( $W_i$ )	0,21	0,21	0,105	0,263	0,21	1

Для каждого завода изготовителя в столбцах с факторами конкурентоспособности поставлены оценки от 1 до 10, показывающие степень удовлетворения потребностям заказчика.

$b_i$  – важность критерия – в этой строке необходимо было поставить цифру от 1 до 5 (5 – максимальная важность для заказчика).

$W$

$i$

– весовой коэффициент – в этой строке рассчитан весовой коэффициент

каждого фактора конкурентоспособности как отношение важности критерия к

с

у Суммарный весовой коэффициент равен единице – значит расчёт произведён верно. Таким образом, весовой коэффициент  $W_i$  показывает долю важности каждого из факторов конкурентоспособности.

е

Таблица 11 - Оценка конкурентоспособности экспертом №2

Важность	Название	Простота	Универсальность	Распространённость	Технические характеристики	Графическая интерпритация	Сумма
с	ANSYS	8/1,68	10/2,1	6/0,63	7/1,84	10/2,1	8,35
т	MDynaMix	9/1,89	6/1,26	3/0,315	9/2,367	2/0,42	6,25
й	OpenFOAM	3/0,63	6/1,26	3/0,315	5/1,315	3/0,63	4,15
в	Comsol	9/1,89	10/2,1	7/0,735	10/2,63	9/1,89	9,24
е	Важность ( $b_i$ ) [1-5]	4	4	2	5	4	19
х	Вес ( $W_i$ )	0,21	0,21	0,105	0,263	0,21	-

ф

а Таблица 12 - Оценка конкурентоспособности экспертом № 3

К	Название	Простота	Универсальность	Распространённость	Технические характеристики	Графическая интерпритация	Сумма
т	ANSYS	9/1,89	7/1,47	8/0,84	6/1,57	9/1,89	7,66
о	$\frac{b_i}{b_{\Sigma}}$ MDynaMix	8/1,68	8/1,68	5/0,525	7/1,84	4/0,84	6,56
р	OpenFOAM	4/0,84	5/1,05	4/0,42	3/0,78	4/0,84	3,9

Comsol	10/2,1	9/1,89	8/0,84	8/2,1	10/2,1	9,03
Важность (b <sub>i</sub> ) [1-5]	4	4	2	5	4	19
Вес (W <sub>i</sub> )	0,21	0,21	0,105	0,263	0,21	-

Таблица 13 - Оценка конкурентоспособности экспертом №4

Название	Простота	Универсальность	Распространенность	Технические характеристики	Графическая интерпритация	Сумма
ANSYS	8/1,68	8/1,68	10/1,05	7/1,84	8/1,68	7,93
MDynaMix	7/1,47	5/1,05	7/0,735	4/1,05	2/0,42	4,3
OpenFOAM	2/0,42	10/2,1	6/0,63	6/1,57	10/2,10	6,82
Comsol	5/1,05	4/0,84	8/0,84	3/0,78	9/1,89	5,4
Важность (b <sub>i</sub> ) [1-5]	4	4	2	5	4	19
Вес (W <sub>i</sub> )	0,21	0,21	0,105	0,263	0,21	1

Таблица 14- Итоговые экспертные оценки

Название	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Средняя оценка
----------	------------	------------	------------	------------	----------------

ANSYS	9,249	8,35	7,66	7,93	8,25
MDynaMix	6,253	6,25	6.56	4,3	5,84
OpenFOAM	3,888	4,15	3,93	6,82	4,69
Comsol	9,511	9,24	9,03	5,4	8,31

В итоге, по результатам четырех независимых экспертных оценок, самый худший результат получил язык программирования OpenFOAM, а высший средний балл по предоставленным критериям отбора получил язык моделирования Comsol Multiphysics.