

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа \_\_\_ Инженерная школа новых производственных технологий\_\_\_  
 Направление подготовки \_\_\_ 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
 машиностроительных производств\_\_\_  
 Отделение школы (НОЦ) \_\_\_ Отделение материаловедения\_\_\_

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование износа динамически нагруженной пары трения при вращательном движении исполнительного органа

УДК \_\_\_ 621.891:62-233\_\_\_

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ91	Шеповалов Игорь Максимович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е.	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л. Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин А.А.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств	Н.В. Мартюшев	К.Т.Н.		

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>P1</b>	Применять <i>глубокие естественнонаучные и математические знания</i> для создания нового технологического оборудования и машин.	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК2, 3). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P2</b>	Применять <i>глубокие знания</i> в области современного машиностроительного производства для решения <i>междисциплинарных инженерных задач</i>	Требования ФГОС ВО (ПК-1-4). Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P3</b>	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , связанные с созданием и обработкой новых изделий с использованием системного анализа и моделирования объектов машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-5-9). Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P4</b>	<i>Разрабатывать</i> и использовать новое оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-15-17). Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P5</b>	Проводить теоретические и модельные исследования в области машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК16). Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P6</b>	Внедрять и обслуживать современные высокотехнологические линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на машиностроительном производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ВО (ОК-2, ПК-9, ПК-11, 12, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Универсальные компетенции		
<b>P7</b>	Использовать <i>глубокие знания</i> для <i>инновационной инженерной деятельности</i> с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС ВО (ОПК-4, ПК2, ПК-3, ПК-13, ПК-14, ПК-18). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P8</b>	<i>Активно</i> владеть <i>иностранном языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОПК-3, ОПК-4, ПК-13, ПК-18). Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<b>P9</b>	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ПК18). Критерий 5 АИОР (п. 2.13), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P10</b>	Демонстрировать <i>глубокие знания</i> социальных, этических и культурных аспектов, компетентность в вопросах устойчивого развития	Требования ФГОС ВО (ОК-2). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
<b>P11</b>	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-3). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШНПТ  
 Направление подготовки (специальность) 15.04.05 «Конструкторско-технологическое  
 обеспечение машиностроительных производств»  
 Отделение школы (НОЦ) материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Н.В. Мартюшев  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ91	Шеповалов Игорь Максимович

Тема работы:

Моделирование износа динамически нагруженной пары трения при вращательном движении исполнительного органа	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№111-36/с от 21.04.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

24.05.2021

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	№ п/п	Наименование	Единицы измерения	Значение
	1	Пара трения	-	вал-колодки
	2	Режим нагружения силового нагружения	-	произвольный
	3	Режим скоростного нагружения	-	произвольный
	4	Частота вращения	об/мин	0...500
	5	Нормальное усилие	Н	0...500
	6	Диаметр контртела	мм	50
	7	Высота контртела	мм	10
	8	Материал контртела	-	Сталь 38ХМЮА

	9	Материал колодок	-	Бронза оловянистая
	10	Длина колодок	мм	16
		Ширина колодок	мм	6
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор методов и средств моделирования трения и износа узлов технических систем.</li> <li>2. Анализ факторов и законов нагружения, влияющих на трение и износ узла трения технической системы.</li> <li>3. Построение твердотельной и математической модели узла трения технической системы.</li> <li>4. Теоретическое исследование математической модели в программном пакете конечно-элементного анализа при произвольном нагружении узла трения технической системы.</li> <li>5. Сравнительный анализ теоретических исследований с точки зрения напряженно-деформированного состояния узла трения технической системы.</li> </ol>			
<b>Перечень графического материала</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор методов и средств моделирования трения и износа узлов технических систем.</li> <li>2. Анализ факторов и законов нагружения, влияющих на трение и износ узла трения технической системы.</li> <li>3. Математическая модель узла трения технической системы.</li> <li>4. Графические зависимости теоретического исследования в программном пакете конечно-элементного анализа при произвольном нагружении узла трения технической системы.</li> <li>5. Сравнительный анализ теоретических исследований с точки зрения напряженно-деформированного состояния узла трения технической системы.</li> <li>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> <li>7. Социальная ответственность.</li> </ol>			
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>				
	<b>Раздел</b>		<b>Консультант</b>	
	1. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		Спицына Л. Ю.	
	2. Социальная		Сечин А.А.	

ответственность	
3. Иностранный язык	Миронова В.Е.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Обзор существующих решений; теоретический анализ; принципиальная схема системы; математическое моделирование системы.	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н		01.10.2019

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ91	Шеповалов Игорь Максимович		01.10.2019

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШНПТ  
 Направление подготовки (специальность) 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
 Уровень образования магистр  
 Отделение школы (НОЦ) материаловедения  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2020/2021 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	24.05.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Основная часть	60
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
	Социальная ответственность	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»	Н.В. Мартюшев	кандидат технических наук		

## РЕФЕРАТ

Данная выпускная квалификационная работа содержит 157 с., 47 рисунков, 33 таблицы, 19 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: трение, износ, модель Арчарда, пара трения, трибосопряжения, математическая модель, динамические процессы, ANSYS, ABAQUS, COMSOL.

Объектом исследования является износ пары трения «вал-колодки».

Цель работы – разработка компьютерной модели изнашивания пары трения «вал-колодки» при динамическом режиме нагружения.

В процессе исследования проводилось моделирование динамического нагружения пары трения «вал колодки» в программном пакете конечно-элементного анализа ANSYS.

В результате исследования было проанализировано влияние износа на напряженно деформированное состояние колодки.

В будущем планируется разработка собственной модели изнашивания учитывающие влияние на износ температуры нагрева, наличие смазочного слоя.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Трение — это механическое сопротивление, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении, сопровождающееся выделением тепла, электризацией тел, и т.д.

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ — результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Величина износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Трибосопряжение — это сложная термодинамическая система, в которой происходит преобразование энергии механического движения в другие виды (теплоту, колебания и др.) с передачей преобразованной энергии внешней среде.

ПО – программное обеспечение;

SWOT анализ – S-сильные стороны, W-слабые стороны, O-возможности, T- угрозы.

### **Нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003 – 2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

2. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».

3. СанПиН 2.2.4.548 – 96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

4. ГОСТ 30494 – 2011. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

5. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

6. СНиП 23 – 05 – 95. «Естественное и искусственное освещение».

7. ГОСТ 12.0.002 – 2014. «Система стандартов безопасности труда. Термины и определения».

8. ГОСТ 12.1.019 – 2017 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

9. ГОСТ 12.1.004 – 91 ССБТ. «Пожарная безопасность».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ .....	8
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки .....	9
Оглавление .....	11
Введение .....	14
1 Литературный обзор .....	16
1.1 Факторы влияющие на износ .....	16
1.2 Законы изнашивания .....	17
1.2.1 Модель Арчарда .....	19
1.3 Программные продукты для моделирования износа .....	20
1.3.1 ANSYS .....	21
1.3.2 ABAQUS .....	30
1.3.3 COMSOL Multiphysics .....	33
1.3.4 Сравнение и выбор средства компьютерного моделирования износа .....	37
2 Объект и методы исследования .....	41
3 Расчеты и аналитика .....	44
3.1 Исходные данные .....	44
3.2 Планируемые результаты моделирования .....	45
3.3 Построение геометрической и конечно элементной модели пары трения «вал-колодки» .....	47
3.4 Контактное взаимодействие и износ .....	49
3.5 Задание граничных условий и нагрузки .....	50
3.6 Настройка свойств анализа .....	52
3.7 Анализ результатов моделирования .....	53
4 Финансовый менеджмент .....	62
4.1 Предпроектный анализ .....	62
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	62

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	64
4.1.3 FAST-анализ .....	67
4.1.4 SWOT-анализ.....	75
4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	82
4.2 Инициация проекта.....	85
4.2.1 Цели и результат проекта.....	85
4.2.2 Организационная структура проекта.....	87
4.2.3 Ограничения и допущения проекта .....	88
4.3 Планирование научно-исследовательских работ .....	90
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	90
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	92
4.3.3 Бюджет научного исследования.....	96
4.4 Определение ресурсоэффективности научного исследования .....	106
5 Социальная ответственность .....	111
Введение.....	111
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	111
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	111
5.1.2 Производственная безопасность .....	113
5.2 Анализ факторов производственного процесса, которые может создать объект исследования. ....	114
5.2.1 Механические опасные факторы.....	114
5.2.2 Термические опасные факторы .....	116
5.2.3 Химические факторы.....	116
5.2.4 Электрический ток и короткое замыкание.....	117
5.2.5 Микроклимат.....	119

5.2.6 Освещенность рабочей зоны.....	120
5.2.7 Психологические факторы.....	123
5.3 Экологическая безопасность.....	125
5.3.1 Влияние смазывающих жидкостей на атмосферу .....	125
5.3.2 Влияние смазывающих жидкостей на гидросферу .....	125
5.3.3 Влияние частиц абразивного износа на литосферу.....	126
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	126
5.4.1 Профилактические мероприятия.....	127
5.4.2 Требования пожарной безопасности к путям эвакуации.....	128
5.5 Последовательность действий при возникновении пожара .....	129
5.5.1 Действия сотрудника лаборатории (инженера).....	129
Выводы.....	131
Заключение .....	132
Список используемой литературы .....	133
Приложение А .....	135
Приложение Б.....	158

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** В современном машиностроении одной из главных проблем является увеличение срока службы на всех этапах жизненного цикла изделия. Для увеличения срока службы трибосопряжения необходимо изучение процессов изнашивания. Изучение износа пар трения позволяет оценить характер и скорость изнашивания. Основная часть трибосопряжения находится под действием динамических нагрузок.

Применение компьютерного моделирования к исследованию износа пар трения позволяет прогнозировать величину и характер износа. Современные программные пакеты конечно-элементного анализа позволяют моделировать и прогнозировать износ, а также оценивать влияние износа на работу пары трения.

### **Цель и основные задачи исследования**

**Цель:** разработка компьютерной модели изнашивания пары трения «вал-колодки» при динамическом режиме нагружения.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Анализ современных методов и средств компьютерного моделирования трения и износа узлов технических систем.
2. Анализ факторов, влияющих на трение и износ в узлах трения.
3. Анализ существующих законов, описывающих изнашивание пар трения.
4. Построение математической модели пары трения «вал-колодки».
5. Теоретическое исследование математической модели в программном пакете конечно-элементного анализа при произвольном нагружении узла трения.
6. Сравнительный анализ теоретических исследований с точки зрения напряженно-деформированного состояния узла трения.

**Объект исследования** – износ пар трения технических систем

**Предмет исследования** – распределение износа в паре трения «вал-колодки» а также оценка динамический свойств модели.

**Научная новизна полученных результатов** – разработка методики моделирования износа пар трения.

**Практическое значение полученных результатов** - разработка алгоритма оценки износа и его влияния на работу пары трения.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Факторы влияющие на износ

Износ - изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия, инструмента вследствие разрушения (изнашивания) поверхностного слоя изделия при трении [1, 2].

В результате изнашивания происходит снижение производительности трибосопряжения, увеличиваются потери, появляются шумы и вибрации в работе машин и механизмов.

На характер изнашивания значительное влияние оказывают различные внешние факторы [1]: структура и твердость материала, смазка, абразив, окружающая среда, температура, характер и направление скольжения. Ниже (рисунок 1) приводятся примеры такого влияния.



Рисунок 1 - Факторы, влияющие на износ.

## 1.2 Законы изнашивания

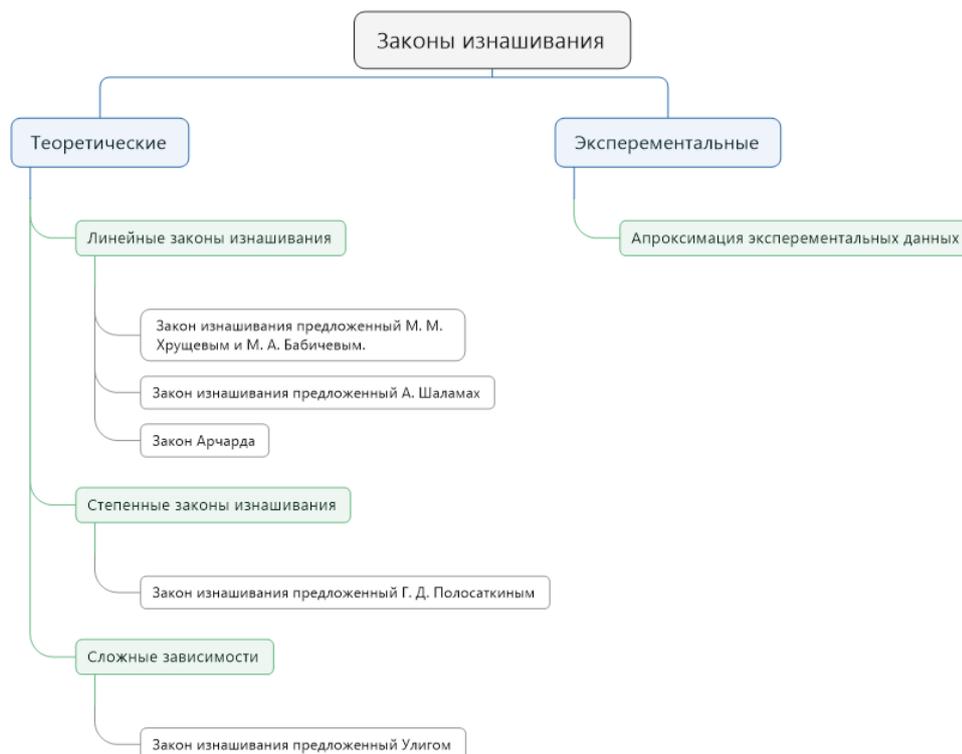


Рисунок 2 – Примеры законов изнашивания

Примерами линейных законов изнашивания могут быть:

Закон изнашивания М.М. Хрущева и М.А. Бабичева, построенный на теории абразивного изнашивания [1, с. 11] в 1941 согласно которой износ поверхностей материала производится большим количеством микронеровностей в виде жестких пирамид разной высоты:

$$I = c_1 \cdot P/H, \quad (1)$$

где  $c_1$  – некоторый коэффициент представляет собой согласно теории Хольма (1946) вероятность отделения атома при его столкновении с другим атомом ( $c_1 \cong 10^{-5}$ );

$P$  – контактное давление, МПа;

$H$  – твердость материала, МПа.

Закон изнашивания А. Шалламаха предполагает упругий контакт микронеровностей контактных поверхностей [1, с. 12] в 1954 получил зависимость:

$$I = c_2 \cdot \frac{P}{E}, \quad (2)$$

где:  $E$  – модуль упругости материала, МПа;

$c_2$  – коэффициент пропорциональный радиусу кривизны микронеровностей

Так же к линейным зависимостям износа от контактного давления приводят и теории, основанные на энергетической концепции изнашивания.

К линейным законам изнашивания так же относится модель износа Арчарда [1, с. 12], которая представляет собой линейную зависимость скорости износа от контактного давления и скорости относительного скольжения. В дальнейшем рассмотрим данную модель подробнее.

Примером степенного закона изнашивания может быть:

Зависимость полученная Г. Д. Полосаткиным [1, с. 12] в 1946 представляет собой степенную зависимость износа от контактного давления:

$$I = c \cdot (\mu \cdot P)^\gamma, \quad (3)$$

где:  $\mu$  – коэффициент трения,

$c$  и  $\gamma$  – параметры модели

Примером сложной зависимости для износа может быть:

Зависимость построенная Улигом [1, с. 15] (1954) которая основана на теории изнашивания металлов при фреттинг-коррозии:

$$W = (c_1 \cdot \sqrt{P} - c_2 \cdot P) + c_3 \cdot P, \quad (4)$$

где:  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – положительные коэффициенты, зависящие от давления текучести материала и параметров процесса его окисления.

$P$  – контактное давление, МПа;

### 1.2.1 Модель Арчарда

В 1950-х гг. британский инженер Джон Ф. Арчард разработал эмпирическую модель описывающую скорость абразивного износа поверхностей трения [4].

Модель Арчарда позволяет оценить степень изнашивания твердых поверхностей деталей за счет ударного воздействия абразивных частиц.

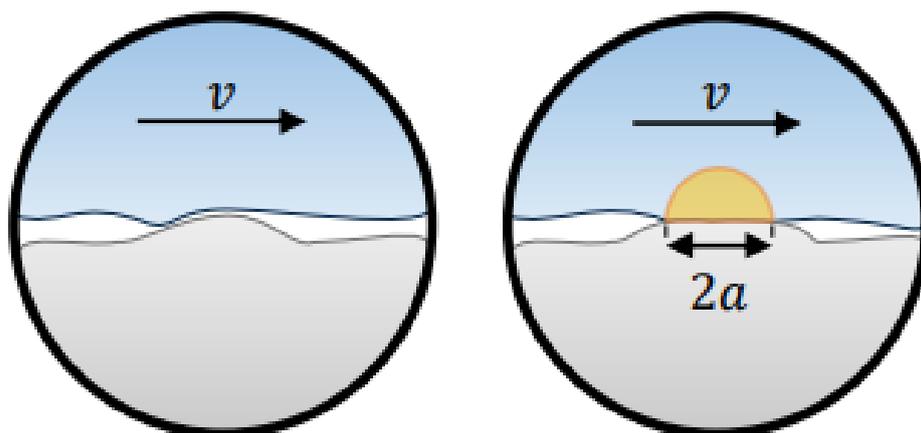


Рисунок 3 - Схема износа для модели Арчарда.

Учитывая адгезионный тип износа, модель предполагает, что скольжение сферы в контакте пластически деформируют шероховатость, у которой предел текучести равен твердости. Средняя контактная нормальная нагрузка запишется в виде:

$$dW = H \cdot \pi \cdot a^2, \quad (5)$$

где:  $a$  - радиус зоны контакта. Предполагается, что полусфера имеет форму частица (рис. 6) с объемом  $2 \cdot \pi \cdot a^3 / 3$  освобождается после скольжения на расстояние  $2 \cdot a$  с вероятностью  $P$ . объем износа на расстояние скольжения равен тогда:

$$\frac{dV}{ds} = \frac{P \cdot 2 \cdot \pi \cdot a^3}{6 \cdot a} = \frac{P \cdot \pi \cdot a^2}{3} = \frac{P \cdot dW}{3 \cdot H}, \quad (6)$$

Интегрируя по отношению к расстоянию скольжения, общий объем износа  $V$ , может быть выражена как функция нагрузки, расстояния скольжения и твердости:

$$V = \frac{K \cdot W \cdot s}{H}, \quad (7)$$

где:  $K$  – постоянный коэффициент износа

$W$  – общая нормальная нагрузка,

$s$  – путь трения поверхностей

$H$  – твердость материала, подверженного износу.

$K$  это безразмерный коэффициент износа, обычно получаемый экспериментально и используемый для характеристики материальный износ. Модель Арчарда является вероятностной моделью.

Модель Арчарда не предназначена для моделирования процессов с большими скоростями, характерными, например, для обработки металла резанием (фрезерованием, точением и т.д.). Модель Арчарда не учитывает воздействие температуры.

### **1.3 Программные продукты для моделирования износа**

Для моделирования процесса изнашивания пар трения в настоящее время применяется метод конечных элементов. Основная идея моделирования износа контактной поверхности заключается в аппроксимации износа функцией (законом) где переменными являются характеристики пары трения такие как скорость скольжения, контактное давление, температура и т.д. В процессе моделирования узлы контактной поверхности смещаются вглубь модели что и имитирует процесс удаления материала. Моделирования изнашивания контактных поверхностей реализовано во многих современных программных пакетах инженерного анализа. Проведем обзор для некоторых из них:

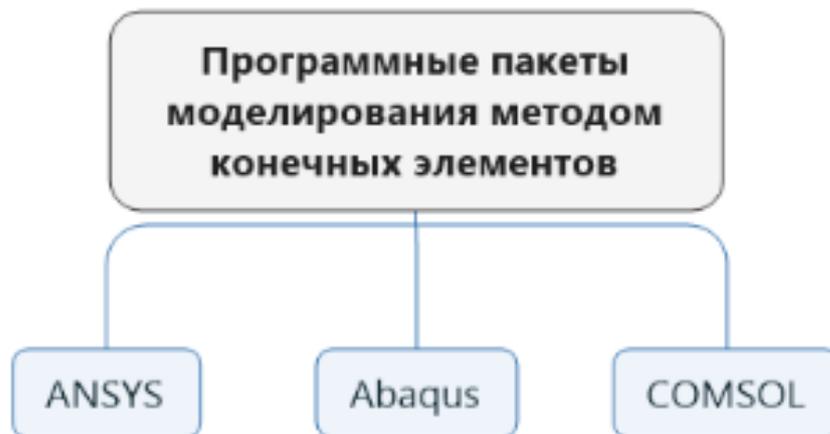


Рисунок 4 – Программные пакеты для моделирования методом конечных элементов

### 1.3.1 ANSYS

ANSYS – универсальный программный пакет конечно-элементного анализа, направленный на решение задач в различных областях инженерной деятельности (динамика и прочность конструкций, теплообмена, механика жидкости и газа, электромагнетизма), а также связанные междисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.). Основным решателем задач механики конструкций является ANSYS Mechanical APDL [9].

Для решения задач механики жидкости и газа в ANSYS присутствуют два основных решателя – Fluent и CFX. Каждый решатель имеет собственную оболочку.

Основной идеей программного комплекса ANSYS является объединение различных решателей и приложений в единой вычислительной среде. В современном ANSYS интегрировано множество решателей с различными наборами математических моделей физических процессов и численных методов. Главной платформой для обмена данными между компонентами и приложения является ANSYS Workbench.

Платформа Workbench позволяет представить расчетный проект в виде структуры, которая наглядно показывает последовательность выполненного расчета. Структурное представление расчета позволяет также систематизировать и хранить полученные результаты.

Модули и приложения, используемые в ANSYS Workbench для подготовки и проведения численного анализа:

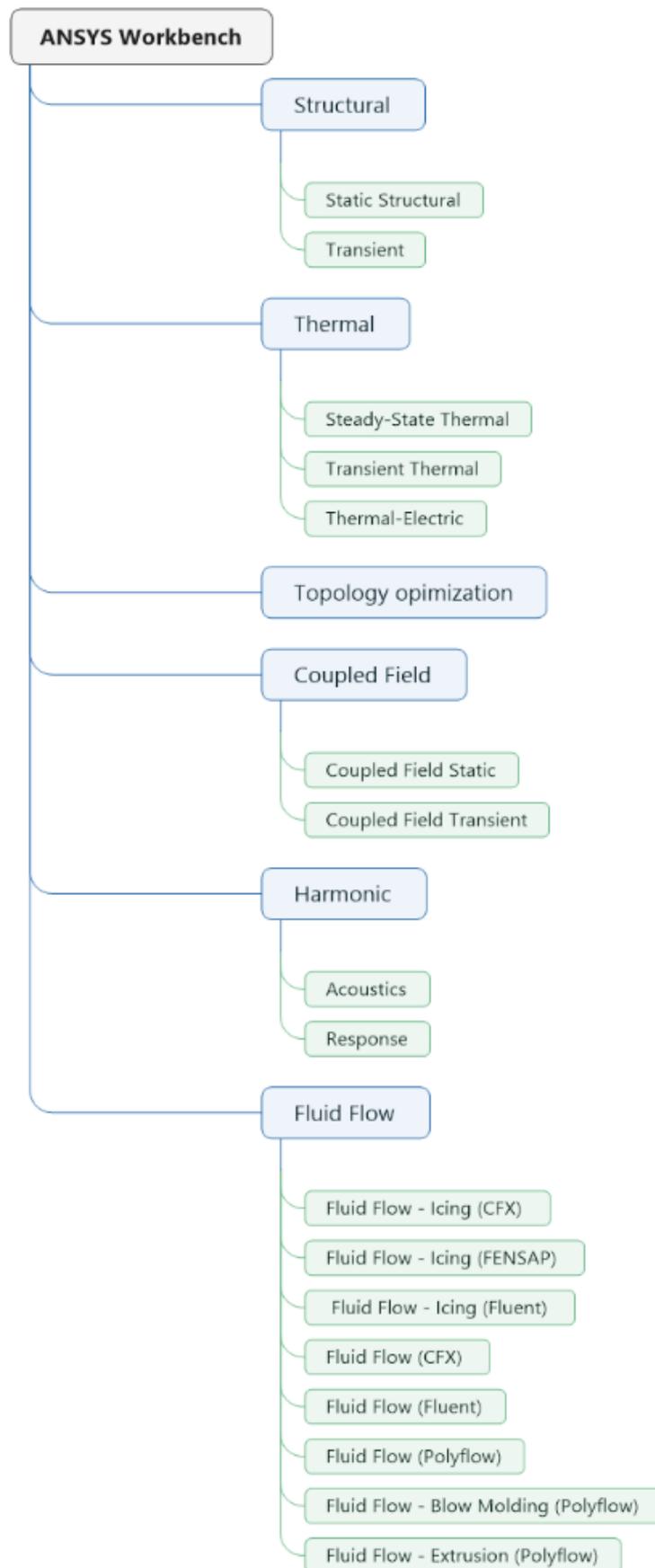


Рисунок 5 – Модули ANSYS Workbench

Static Structural – система для определения перемещений, напряжений и деформаций в конструкциях или компонентах вызванные нагрузками, которые не вызывают значительных инерционных и демпфирующих эффектов. Предполагаются устойчивые условия нагружения и отклика. Предполагается, что нагрузки и отклик конструкции изменяются медленно во времени.

Transient Structural – система для анализа динамической реакции конструкции под действием любых общих зависящих от времени нагрузок. Данная система позволяет определять изменяющиеся во времени перемещения, напряжения, деформации и усилия в конструкции и ее компонентах, когда на нее воздействуют различные переходные нагрузки. Временные и инерционные эффекты считаются важными.

Steady-State Thermal – стационарная тепловая система позволяет определять температуры, температурные градиенты, скорости тепловых потоков и тепловые потоки в объекте, вызванные тепловыми нагрузками, которые не изменяются во времени. Стационарный тепловой анализ вычисляет влияние стационарных тепловых нагрузок на систему или компонент. Стационарный анализ выполняется перед переходным термическим для определения начальных условий так же стационарный термический анализ может быть последним шагом переходного термического анализа, выполняемого после того, как все переходные эффекты уменьшились.

Transient Thermal – система переходного термического анализа определяет температуру и другие тепловые величины, которые изменяются с течением времени. Применяется во многих областях теплопередачи (например, проблемы термообработки, электронная конструкция упаковки, сопла, блоки двигателей, сосуды высокого давления и т. Д.) включают переходные термические анализы.

Thermal-Electric - тепловая электрическая система позволяет одновременно решать тепловые и электрические поля. Эта способность моделировать связанное поле позволяет моделировать джоулевый нагрев для

резистивных материалов, а также эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона для термоэлектричества.

Topology Optimization - система для оптимизации топологии вычисляет оптимальное структурное проектирование вашей геометрии для выбранной области вашей модели с заданными целями проектирования и ограничениями.

Coupled Field Static - Статическая система связанного поля определяет перемещения, напряжения, деформации и силы, вызванные нагрузками, которые не вызывают значительных инерционных и демпфирующих эффектов. Предполагаются устойчивые условия нагружения и отклика. Предполагается, что нагрузки и реакции изменяются медленно по времени. Система поддерживает 2D-сопряженную и структурную теплофизику.

Coupled Field Transient - Переходная система связанного поля определяет изменяющиеся во времени перемещения, деформации, напряжения и силы, реагирующие на любые переходные нагрузки. Система позволяет анализировать 2D-сопряженную и структурную теплофизику.

Eigenvalue Buckling – система для решения задачи устойчивости конструкций на собственные числа. Этот метод соответствует учебному подходу анализа устойчивости; например, исследование устойчивости классической задачи Эйлера. С помощью этой системы проводят анализ потери устойчивости конструкции как в линейной, так и в нелинейной постановке.

Electric - электрическая система поддерживает стационарную электрическую проводимость. Этот анализ применяется для определения электрического потенциала в проводящем теле, создаваемого внешним приложенным напряжением или током. Из полученного решения проводится вычисление других результатов, например токи проводимости, электрические поля и джоулевый нагрев.

Explicit Dynamics - система явной динамики может выполнять различное инженерное моделирование, такое как моделирование нелинейного динамического поведения твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия.

Fluid Flow - Icing (CFX) - система Fluid Flow - Icing (CFX) предназначена для выполнения полного анализа обледенения. Он содержит ячейки для подключения к компонентной системе ANSYS CFX и запуска воздушного потока с помощью решателя CFX, настройки и запуска капель с помощью решателя DROP3D, настройки и запуска обледенения с помощью решателя ICE3D, смещения сетки из-за аккреции льда и визуализации результатов в CFD-Post или Viewmerical.

Fluid Flow - Icing (FENSAP) - Система Fluid Flow - Icing (FENSAP) выполняет полный анализ обледенения. Он содержит ячейки для настройки и запуска воздушного потока с помощью решателя FENSAP, настройки и запуска капель с помощью решателя DROP3D, настройки и запуска обледенения с помощью решателя ICE3D, смещения сетки из-за аккреции льда и визуализации результатов в CFDPPost или Viewmerical.

Fluid Flow - Icing (Fluent) - Система Fluid Flow - Icing (Fluent) выполняет полный анализ обледенения. Он содержит ячейки для подключения к компонентной системе ANSYS Fluent и запуска воздушного потока с помощью Fluent solver, настройки и запуска капель с помощью DROP3D solver, настройки и запуска обледенения с помощью ICE3D solver, смещения сетки из-за аккреции льда и визуализации результатов в CFD-Post или Viewmerical.

Fluid Flow (CFX) - Система Fluid Flow (CFX) выполняет анализ потока несжимаемой и сжимаемой жидкости и теплообмена в сложных геометриях.

Fluid Flow (Fluent) - Система Fluid Flow (Fluent) выполняет анализ потока несжимаемой и сжимаемой жидкости и теплообмена в сложных геометриях.

Fluid Flow (Polyflow) - Системы потока жидкости (Polyflow) анализируют потоки жидкости со свободными поверхностями, сложную реологию (включая неньютоновское поведение с вязкоупругостью), теплопередачу и химические реакции.

В Workbench доступны три системы анализа потока жидкости Polyflow:

Система Fluid Flow (Polyflow) обеспечивает полные возможности моделирования Polyflow

Система Fluid Flow - Blow Molding (Polyflow) обеспечивает только те прикладные возможности Polyflow, которые подходят для моделирования выдувного формования.

Система Fluid Flow - Extrusion (Polyflow) обеспечивает только те прикладные возможности Polyflow, которые подходят для моделирования экструзии.

Harmonic Acoustics - Гармоническая акустическая система определяет установившийся отклик конструкции и окружающей текучей среды на нагрузки и возбуждения, изменяющиеся синусоидально (гармонически) со временем

Harmonic Response - Система гармонического отклика определяет установившийся отклик линейной структуры на нагрузки и возбуждения, изменяющиеся синусоидально (гармонически) со временем.

Hydrodynamic Diffraction - Гидродинамическая дифракционная система вычисляет волновые силы и движения структуры в регулярных или нерегулярных волнах.

### **Износ в ANSYS**

С 2015 года в ANSYS Mechanical появилась возможность моделирования износа материала [8].

Износ — это постепенная потеря материала с поверхности твердого тела при контакте с другим телом. Изнашивание поверхностей контактирующих тел процесс, зависящий от многих факторов, но он может быть аппроксимирован моделями, которые определяют потерю материала в зависимости от различных параметров в контактной паре.

В Mechanical APDL с 2015 года добавлен модуль для моделирования потери материала, из-за износа, который аппроксимируется уравнением, согласно которому происходит перемещение контактных узлов внутрь модели. Для определения износа в ANSYS доступны следующие модели:

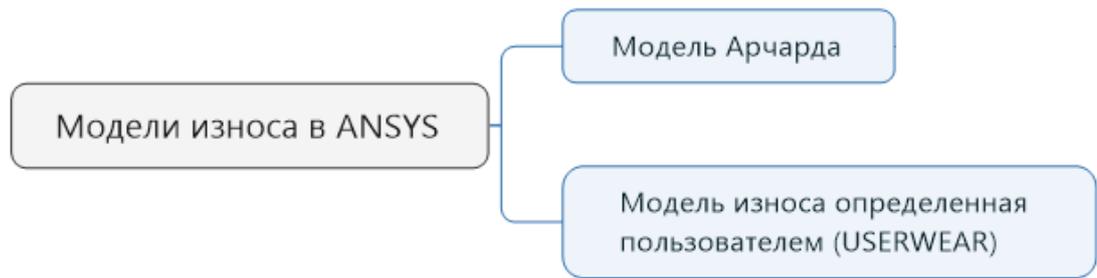


Рисунок 6 – Модели износа в ANSYS

Поскольку контактные узлы перемещаются в новые положения, контактные переменные (например, контактное давление) изменяются, таким образом имитируя эффекты износа.

### Модель Арчарда в ANSYS

Модель износа Арчарда - популярная модель износа при скольжении тел с довольно хорошими результатами моделирования износа. Оригинальная модель, предложенная Арчардом, предполагала, что скорость потери объема из-за износа линейно пропорциональна контактному давлению и скорости скольжения на контактной поверхности. В программе ANSYS реализован обобщенный вариант этой модели, допускающий правильную зависимость закона от контактного давления и скорости [7, с. 555].

Предполагается, что износ происходит во внутреннем нормальном направлении поверхности, принятом за направление, противоположное нормальному направлению контакта. Скорость износа в контактном узле,  $\dot{w}$ , задается:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} \cdot p^m \cdot v_{rel}^n, \quad (8)$$

где:  $K$  – коэффициент износа

$H$  – твердость материала

$p$  – контактное давление

$v_{rel}$  – относительная скорость скольжения

$m$  – показатель давления

$n$  – показатель скорости

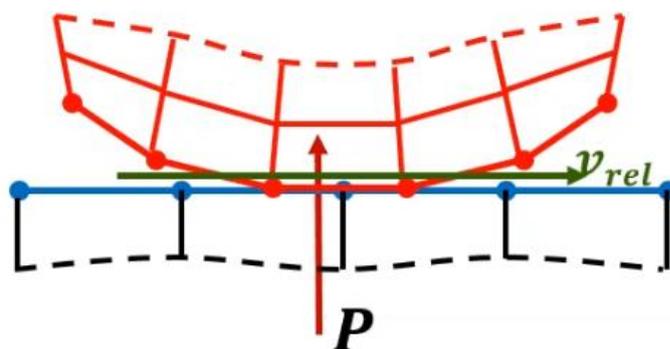


Рисунок 7 – Схема контактного взаимодействия для износа в ANSYS

В приведенном выше уравнении  $K$ ,  $H$ ,  $m$  и  $n$  задаются пользователем на основе экспериментальных исследований.

Износ может быть рассчитан:

1. Используя контактные давления.
2. Используя узловые напряжения в расчете износа.

Если в расчёт используются узловые напряжения, то напряжение, вычисленное в точке гаусса твердого элемента, сначала копируется в его ближайший узел. Контактный элемент, наложенный на твердый элемент, к которому принадлежит точка Гаусса, использует это напряжение  $\sigma$  и контактную нормаль  $n$  для вычисления составляющей вектора тяги в направлении контактной нормали: эта нормальная составляющая вектора тяги используется вместо контактного давления в уравнении скорости износа.

Для моделирования может быть использовано усреднение износа по площади контакта контактной пары таким образом, что общий объем, потерянный из-за износа, совпадает с общим объемом, потерянным из-за износа, когда каждый узел изнашивается с разной величиной. Средний прирост износа рассчитывается как:

$$\dot{w}_{av} = \frac{\sum \dot{w} \cdot A}{\sum A}, \quad (9)$$

где  $A$  представляет площадь контакта в точке, а суммирование происходит по всем точкам контакта в контактной паре.

### 1.3.2 ABAQUS

ABAQUS – программный комплекс в области конечно-элементного расчета на прочность, с помощью которого можно проводить точные вычисления конструкций в линейной и нелинейной постановке [12].

Abaqus, Inc. с 2005 года входит в компанию Dassault Systems. В дальнейшем предполагается создание новой среды моделирования SIMULIA, которая будет содержать решения компаний Dassault Systemes и Abaqus, Inc. в области прочностных расчетов, а также объединять лучшие решения третьих фирм для создания мощного инструментария проектирования и многодисциплинарного анализа конструкции.

ABAQUS состоит из таких основных модулей:

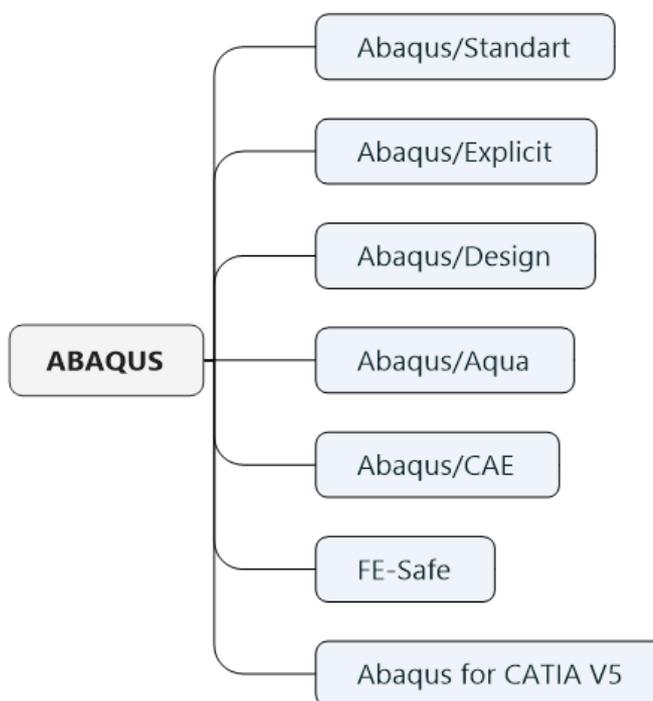


Рисунок 8 – Модули ABAQUS

Abaqus/Standart – модуль предназначен для решения задач статики, динамики, теплопередачи в совокупности с контактными взаимодействиями и нелинейными свойствами материалов, основан на неявной схеме интегрирования.

Abaqus/Standart позволяет решать следующий типы задач:

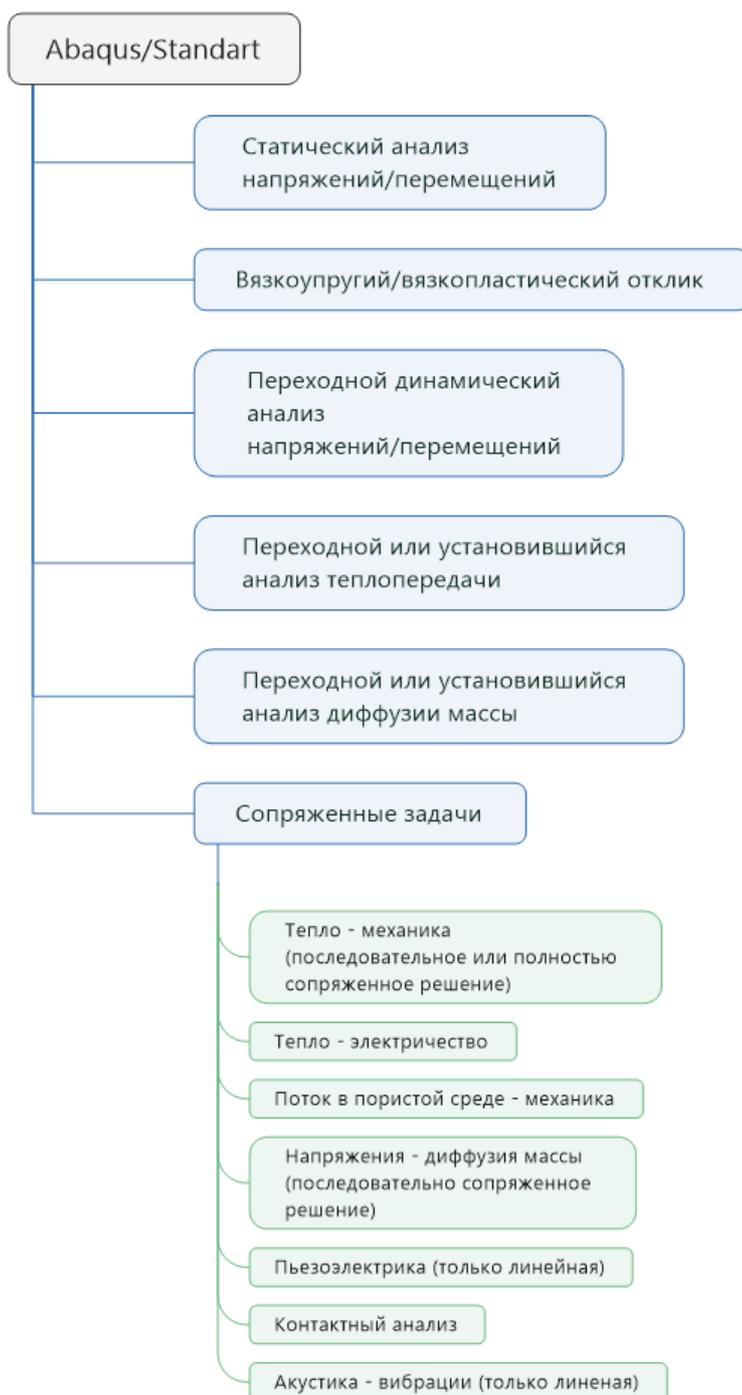


Рисунок 9 – Типы задач, решаемые с помощью Abaqus/Standart

Abaqus/Explicit – модуль основанный на явной схеме интегрирования и предназначен для моделирования быстропротекающих процессов, квазистатики, соударения, моделирования обработки металла давлением.

Abaqus/Explicit позволяет решать следующие типы задач:

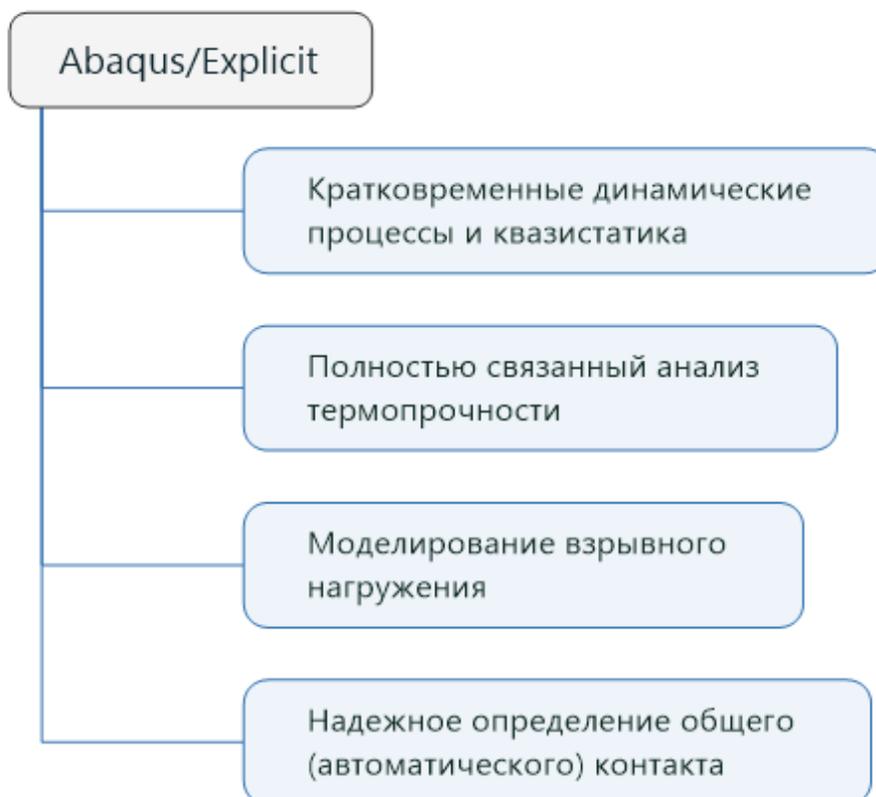


Рисунок 10 - Типы задач решаемые Abaqus/Explicit

Abaqus/Design – модуль позволяющий проводить топологическую и параметрическую оптимизацию конструкций.

Abaqus/Aqua – модуль для моделирования нагрузки на конструкции (кабеля, трубопроводы и фермы) находящиеся в воде.

Abaqus/CAE – модуль для подготовки модели к расчету, а также обработки результатов расчётов проведенных в Abaqus/Standart и Abaqus/Explicit.

FE – Safe – модуль предназначенный для анализа долговечности конструкций а также для моделирования роста трещин.

Abaqus for CATIA V5 – модуль интегрированный в графическую оболочку CATIA V5 позволяет быстро вносить изменения в анализ при проектировании изделий.

### **Износ в ABAQUS**

В отличие от ANSYS для моделирования износа в системе Abaqus необходимо:

- Подключения пользовательских подпрограмм (UPF) которое недоступно в студенческой версии Abaqus.
- Наличие установленного на ПК компилятора Fortran.

Пример моделирования износа шины автомобиля в системе Abaqus представлено в статье [14].

### **Модель Арчарда в ABAQUS**

Модель Арчарда в ABAQUS выглядит следующим образом [12]:

$$\dot{q} = \frac{k}{H} \cdot P \cdot A \cdot \dot{\gamma}, \quad (10)$$

где:  $\dot{q}$  - скорость относительного скольжения;

$k$  – коэффициент износа;

$P$  – контактное давление;

$A$  – контактная площадь;

$\dot{\gamma}$  – скорость скольжения;

### **1.3.3 COMSOL Multiphysics**

COMSOL Multiphysics – универсальная программная платформа для компьютерного моделирования физических процессов методом конечных элементов. Для моделирования доступны модули междисциплинарного анализа. В состав программного комплекса входит среда для разработки пользовательских приложений [13].

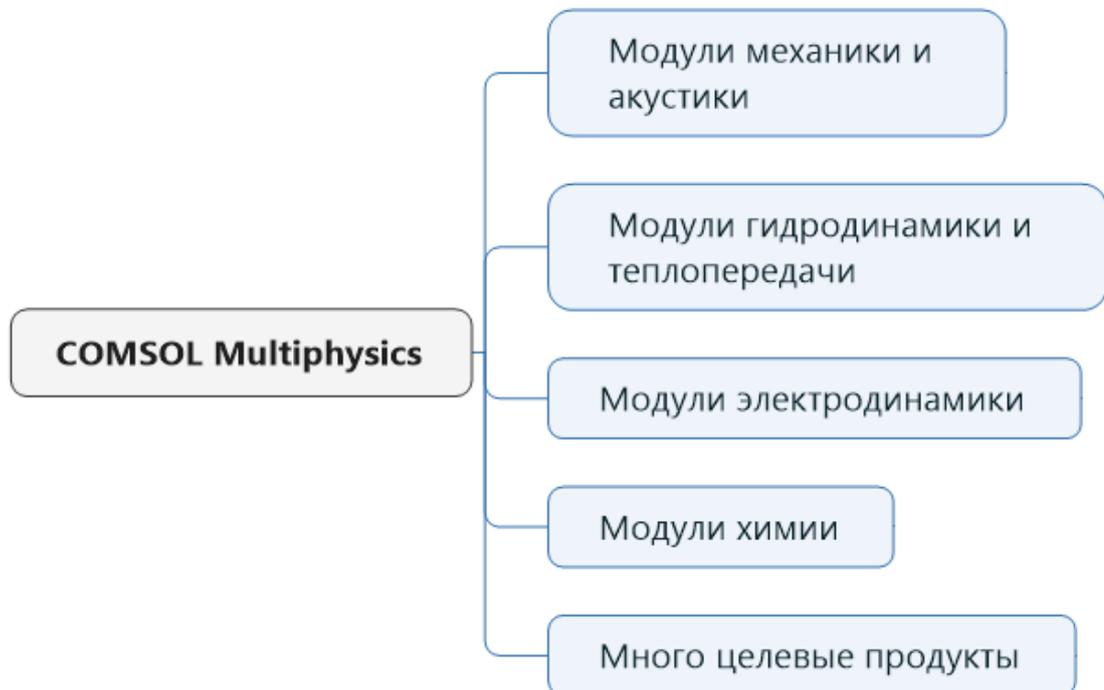


Рисунок 11 - Модули COMSOL Multiphysics

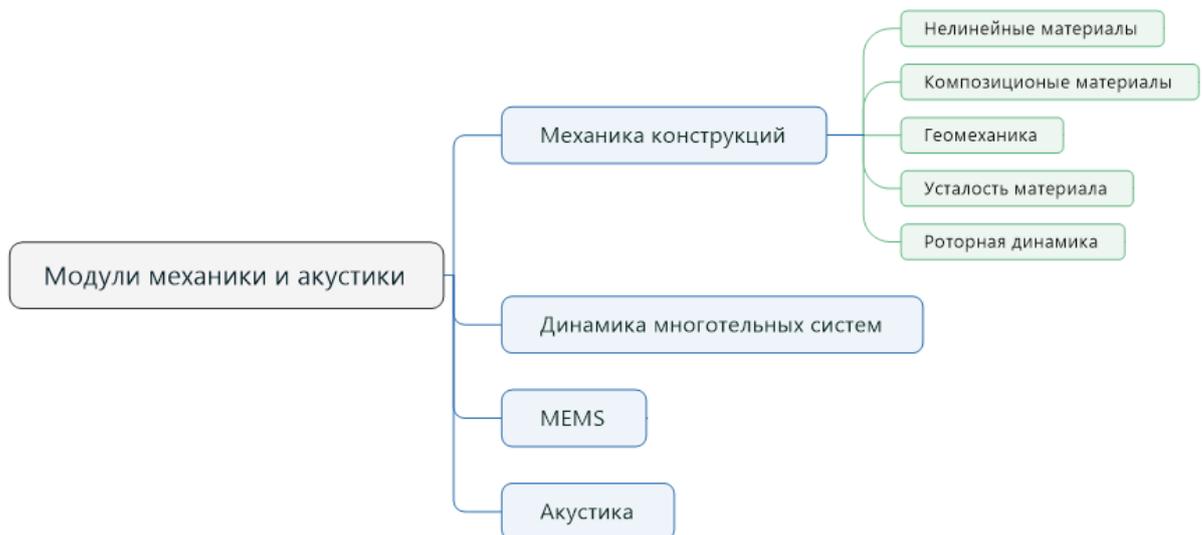


Рисунок 12 - Модуль механики и акустики COMSOL Multiphysics



Рисунок 13 - Модуль гидродинамики и теплопередачи COMSOL Multiphysics



Рисунок 14 - Модуль электродинамики COMSOL Multiphysics



Рисунок 15 - Модуль химии COMSOL Multiphysics

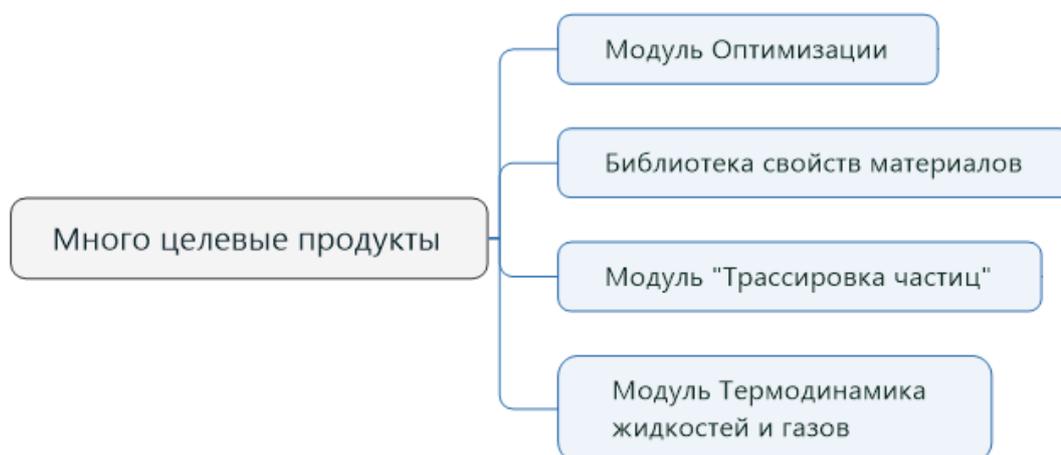


Рисунок 16 - Много целевые продукты COMSOL Multiphysics

### **Износ в COMSOL Multiphysics**

Для моделирования износа в COMSOL Multiphysics используется модель Арчарда. Пример моделирования износа для пары трения «тормозной диск – колодки» представлен в статье [15].

### 1.3.4 Сравнение и выбор средства компьютерного моделирования износа

Сравнение программных продуктов было проведено по следующим критериям (рисунок 17):



Рисунок 17 – Критерии для сравнения программных пакетов компьютерного моделирования

#### **Функциональность**

Пакет программ ANSYS позволяет моделировать большинство физических задач (см выше.). Похожим функционалом обладают ABAQUS и COMSOL. В каждой из программ предусмотрено два способа реализации поставленной задачи:

- С помощью графического интерфейса;
- С помощью встроенного кода;

В ANSYS существует собственный язык программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language), в ABAQUS встроен язык программирования Python, а в COMSOL интегрирован программный код, реализованный с помощью скриптов MATLAB.

В итоге можно сказать сравниваемые программные пакеты обладают схожими функциональными возможностями.

### **Интерфейс**

При выборе программного пакета зачастую не маловажным фактором является комфортность и понятность не только интерфейса, но и возможность решать поставленную задачу без перехода из одной подпрограммы в другую. В связи с этим можно выделить программные продукты COMSOL и ABAQUS которые в отличие от программы ANSYS являются единым продуктом, тогда как ANSYS разделен на множество различных подпрограмм. Однако использование в ANSYS подпрограмм, разработанных различными фирмами под специальные задачи, позволяет разрешать больший спектр задач чем встроенные решатели в COMSOL и ABAQUS.

В результате можно выделить следующее программный пакет ANSYS содержит различные модули для решения различных физических задач, т.е. пользователь может приобрести лицензию только на те модули, которые ему необходимы.

### **Сравнение по точности решения**

В программных пакетах ANSYS и ABAQUS моделирование физического явления заложено на этапе выбора конечного элемента. Формулировки конечных элементов присутствующих в ANSYS и ABAQUS очень схожи что позволяет проводить моделирования практически с одинаковой точностью. В COMSOL моделирования реализуется по средствам написания уравнений, описывающих математическую модель физического явления. Сравнение результатов тестового моделирования ANSYS и COMSOL представлены в статье [19]. Для сравнения точности моделирования в ней приводится задача Кирша о растяжении бесконечной пластины с отверстием в результате ANSYS и COMSOL показали практически одинаковую точность расчета.

## **Возможности для моделирования износа**

В ANSYS и COMSOL моделирования износа реализовано с помощью встроенных в программные продукты средств. Для моделирования изнашивания в ABAQUS необходимо скомпилировать модель износа с помощью компилятора Fortran или C++. В ANSYS для моделирования износа присутствует модель Арчарда которая может быть настроена пользователем конкретно под свою задачу путем определения свойств модели.

Однако для в ANSYS и ABAQUS нет возможности для задания пользовательской модели износа встроенными средствами программ.

## **Лицензия**

Один из основных критериев выбора программного продукта для моделирования являлось его доступность исследователю.

Программный пакет COMSOL не имеет специальной студенческой лицензии, пробный период использования лицензионного программного обеспечения 14 дней что являет недостаточным для освоения исследователем программного продукта.

Программный пакет ABAQUS предоставляет студенческую лицензию сроком на 1 год, но обладает следующими ограничениями:

- Для моделирования доступно только 1000 узлов/элементов что крайне мало для построения качественной конечно-элементной модели пары трения;
- В студенческой версии программы отсутствует возможность написания и работы с подпрограммой для моделирования износа.

Программный пакет ANSYS предоставляет студенческую лицензию сроком на 1 год, так же имеются следующие ограничения:

- Для моделирования доступно 128000 узлов/элементов данной количество позволяет создать качественную конечно-элементную модель пары трения;

- Для моделирования доступна модель Арчарда в которой не учитывается влияние на износ температуры нагрева;

В результате проведенного сравнения можно сказать следующее:

- Все рассмотренные программные пакеты позволяют моделировать различные физические явления практически с одинаковой точностью.
- Моделирование износа доступно в каждом программном пакете.
- Каждый программный продукт позволяет автоматизировать процесс моделирования при помощи встроенных языков программирования.

Для моделирования износа в данной работе был выбран ANSYS так как он обладает всеми необходимыми для моделирования возможностями, а также имеет более расширенную студенческую лицензию.

## 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объект исследования:** пара трения «вал-колодки»

Для моделирования была выбрана пара трения «вал-колодки» исходя из следующих соображений:

- Данная модель позволяет реализовывать различные динамические законы нагружения такие как вращательный и возвратно вращательный.
- Возможность обеспечения различного значения коэффициента перекрытия поверхностей.
- Более равномерную площадь соприкосновения тела и контртела.
- Для проведения испытаний в лаборатории ТПУ имеется автоматизированный триботехнический стенд в котором реализована пара трения «вал-колодки» что позволит корректно настроить модель.

**Методы исследования:** для исследования было применено компьютерное моделирование методом конечных элементов.

**Обоснование методов исследования, моделирования:**

Применение метода конечных элементов для исследования контактного взаимодействия пары трения «вал-колодки». Для исследования изнашивания динамически нагруженной пары трения «вал-колодки» необходимо построить ее математическую модель. Для проведения моделирования был выбран программный пакет ANSYS реализующий расчет методом конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой один из способов решения уравнений в частных производных. Данный метод получил широкое распространение при проведении инженерных расчётов так как позволяет проводить вычисления для тел имеющей сложную пространственную геометрию. Данный подход позволит провести моделирование контактного взаимодействия пары трения «вал-колодки» при динамическом нагружении с учетом изменения геометрии вследствие изнашивания.

С помощью программных пакетов реализующих метод конечных элементов – построение математической модели пары трения «вал-колодки» в программном пакете ANSYS для проведения исследования контактного взаимодействия с учетом износа.

### **Описание используемого программного обеспечения:**

Программный пакет ANSYS позволяет моделировать сложные контактные взаимодействия.

### **Допущения и ограничения при моделировании износа в ANSYS**

При моделировании износа в ANSYS существуют следующие рекомендации и ограничения [8, с. 293]:

1. Моделирование износа возможно только для квазистатического и переходного динамического анализа.
2. Модель и параметры износа должны быть определены до проведения расчета.
3. Коэффициенты износа могут изменяться в зависимости от времени.
4. В случае использования нелинейного перестроения сетки, будут использоваться данные износа, определенные на первом шаге нагрузки, независимо от того, какой шаг нагрузки используется в качестве точка перезапуска.
5. Используйте износ только со следующими алгоритмами контакта: Расширенная функция Лагранжа (Augmented Lagrangian) или Штрафная функция (Penalty function). Использование износа с чистым алгоритмом лагранжевых (pure Lagrangian) контактов может привести к проблемам сходимости и не рекомендуется.

6. Износ доступен только тогда, когда точка обнаружения контакта является узловой точкой.
7. Износ доступен только для следующих типов контактной поверхности: стандартная (standard) и шероховатая (rough).
8. При моделировании износа рекомендуется, чтобы нижележащие элементы (под контактными элементами) были структурными твердыми элементами или структурными твердыми элементами со связанными полями.
9. Износ не доступен для слоистых твердых тел.
10. Моделирование износа возможно для асимметричного и симметричного контакта
11. Во время изменения зонирования, поскольку геометрия обновляется с учетом накопленного износа, износ устанавливается равным нулю (аналогично смещению) при последующем перезапуске. То же верно и для адаптивности нелинейной сетки; геометрия обновляется с учетом накопленного износа, и износ устанавливается равным нулю всякий раз, когда выполняется адаптивность нелинейной сетки.

### 3 РАСЧЕТЫ И АНАЛИТИКА

#### 3.1 Исходные данные

Исходные данные для моделирования износа пары трения «вал-колодки» были взяты из условий испытания пары трения. На рисунке 16 представлена модель пары трения «вал-колодки» в системе автоматизированного проектирования SolidWorks.

Моделирования было проведено для следующих условий:

- Скорость скольжения - 1,3 м/с
- Режим силового нагружения постоянный;
- Сила, действующая на колодку – 500 Н;
- Коэффициент трения  $\mu_{тр} = 0,2$ ;
- Частота вращения вала  $n = 500 \frac{об}{мин}$ ;

Так же для были заданы следующие свойства материалов:

- Для вала (контртела) – Сталь 38Х2МЮА;
- Для колодок – Оловянистая бронза

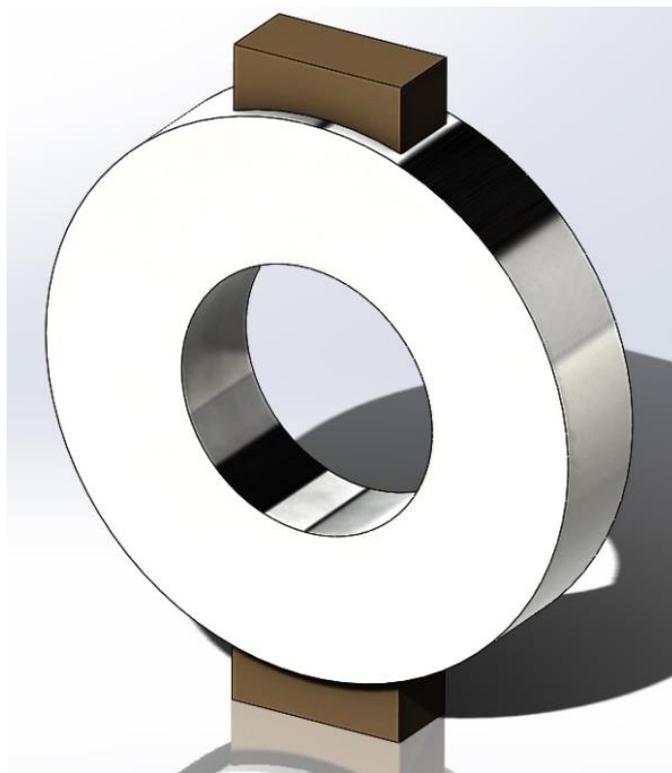


Рисунок 18 - Модель пары трения «вал-колодки» в Solidworks

Геометрические размеры пары трения «вал-колодки» представлены в таблице 2:

Таблица 1 - Геометрические параметры пары трения «вал-колодки»

Вал	
Диаметр наружный	50 мм
Диаметр внутренний	24 мм
Длина	10 мм
Материал	Сталь
Колодка	
Длина колодки	16 мм
Ширина колодки	6 мм
Высота колодки	7 мм
Материал	Оловянистая бронза

### 3.2 Планируемые результаты моделирования

Для анализа результатов моделирования необходимо получить следующие данные:



Рисунок 19 – Контактное давление



Рисунок 20 – Распределение напряженного состояния

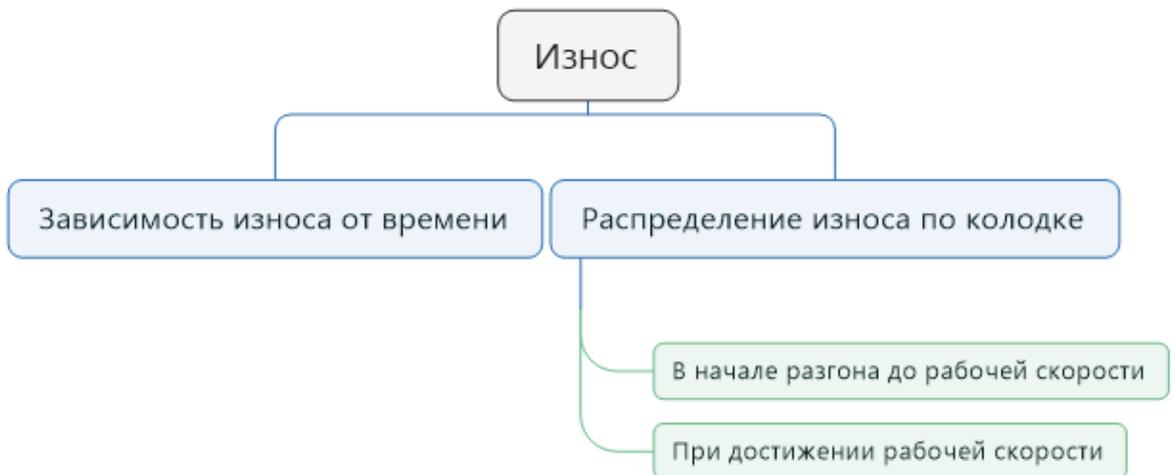


Рисунок 21 – Износ



Рисунок 22 – Распределение температуры нагрева

### 3.3 Построение геометрической и конечно элементной модели пары трения «вал-колодки»

В начале была построена 3D модель пары трения вал колодки в системе автоматизированного проектирования SolidWorks (рисунок 16).

Построенная 3D модель была импортирована в ANSYS Workbench. Для моделирования использовался модуль «Coupled Field Transient» который предназначен для моделирования связанных задач таких как «тепловая-механическая».

Для 3D модели были определены материалы разделе «Engineering data» согласно исходным данным:

- Для вала - Structural steel;
- Для колодок - Bronze, C51000;

Модель была разбита на конечные элементы. Для построения сетки использовался общий размер конечного элемента 1 мм. Построенная, конечно-элементная модель представлена на рисунке 23.

Для построения сетки в ANSYS Mechanical был автоматически выбран трехмерный 20 узловой конечный элемент связанного поля SOLID226 данный элемент предназначен для моделирования различных физических комбинаций (рисунок 22) геометрическое представления элемента SOLID226 [7] представлено на рисунке 22:



Рисунок 23 - Элемент SOLID226

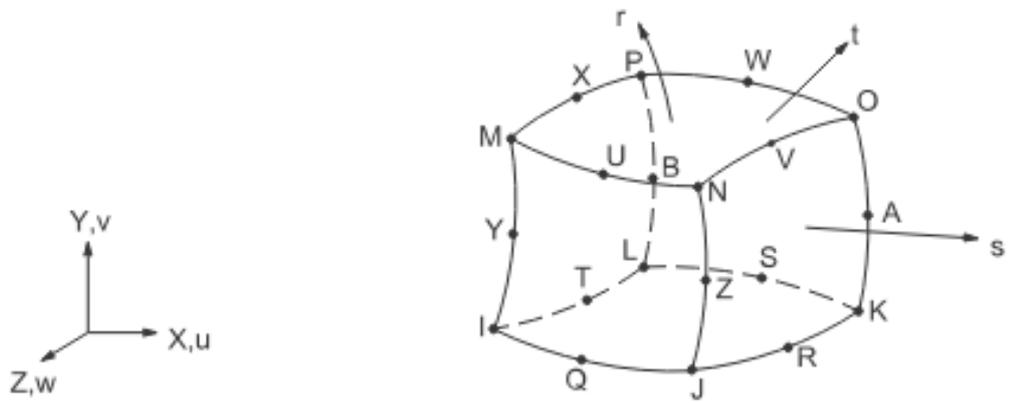


Рисунок 24 - Конечный элемент SOLID226

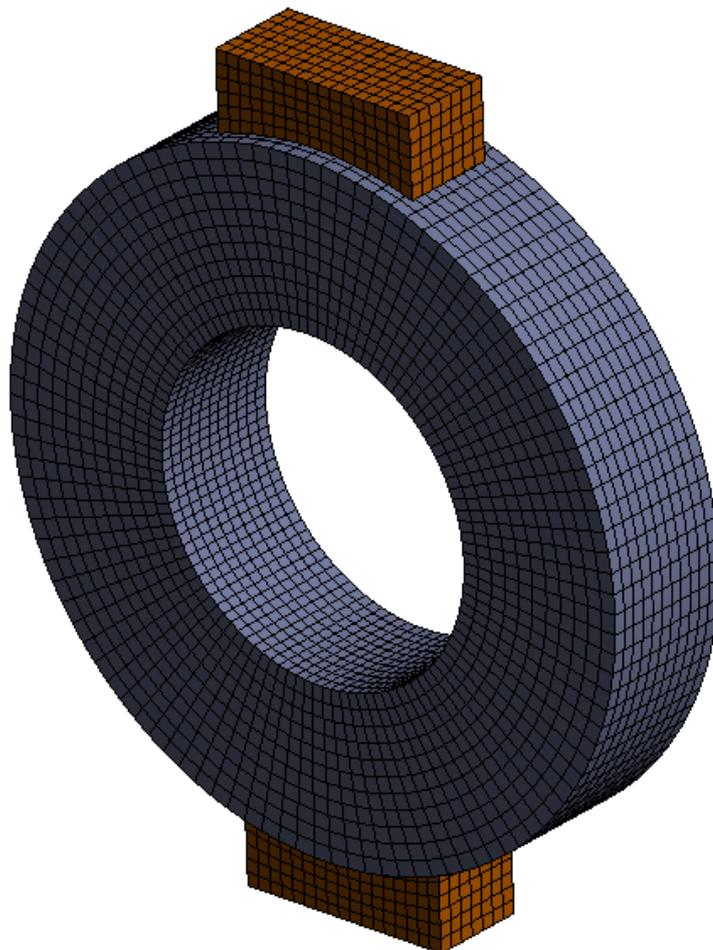


Рисунок 25 - Конечнo элементная модель пары трения «вал-колодки»

### 3.4 Контактное взаимодействие и износ

Модель пары трения «вал-колодки» состоит из трех тел. Контакт с трением моделируется между каждой колодкой и валом путем наложения на поверхности контактных и целевых элементов (CONTA174 и TARGET170).

В модели используется асимметричный контакт для имитации износа только колодок, контактные элементы определены на поверхности колодок.

В ANSYS Workbench нет встроенной опции для моделирования модели износа Арчарда. Поэтому для включения этой модели используется фрагмент команды, написанный на встроенном языке APDL (ANSYS Parametric Design Language).

Контактные элементы определены на изнашиваемой поверхности. Модель износа Archard определяется командой TB, WEAR, MATID, ARCD, а модель износа связывается с контактными элементами через MATID (cid), указанный в TB, WEAR.

Модель износа Арчарда задается путем ввода констант от C1 до C4 в команде TBDATA. Эти константы представляют собой коэффициент износа (K), твердость материала (H), показатель контактного давления (m) и показатель скорости скольжения (n) в таблице 3 приведены константы модели Арчарда принятые для данного моделирования:

Таблица 2 - Параметры модели Арчарда

K	H	m	n	C5
1.75e-2	80	1	1	0

Чтобы инициировать износ после достижения устойчивого состояния по отношению к нагрузке, TB, WEAR используется вместе с TBFIELD, TIME. Задача была разделена на два шага нагрузки. На первом шаге нагружения усилие повышается до желаемого уровня, а износ неактивен. На втором этапе нагружения давлением поддерживается постоянным и активируется износ.

### 3.5 Задание граничных условий и нагрузки

Для задания вращения вала использовалось соединение «Joint Revolute» который имеет только одну степень свободы – вращение вокруг оси Z. Соединение «Joint Revolute» осуществляется следующим образом программа автоматически определяет центр выбранной пользователем цилиндрической поверхности и создает в нем «пилотный узел» который соединяется с узлами выбранной поверхности с помощью жестких связей так же данное соединение позволяет прикладывать нагрузку в виде скорости вращения.

Для колодок был применено соединение «Joint Translational» который так же имеет одну степень свободы – движение по оси X рисунок 24. Соединение «Joint Translational» осуществляется так же, как и соединение «Joint Revolute».

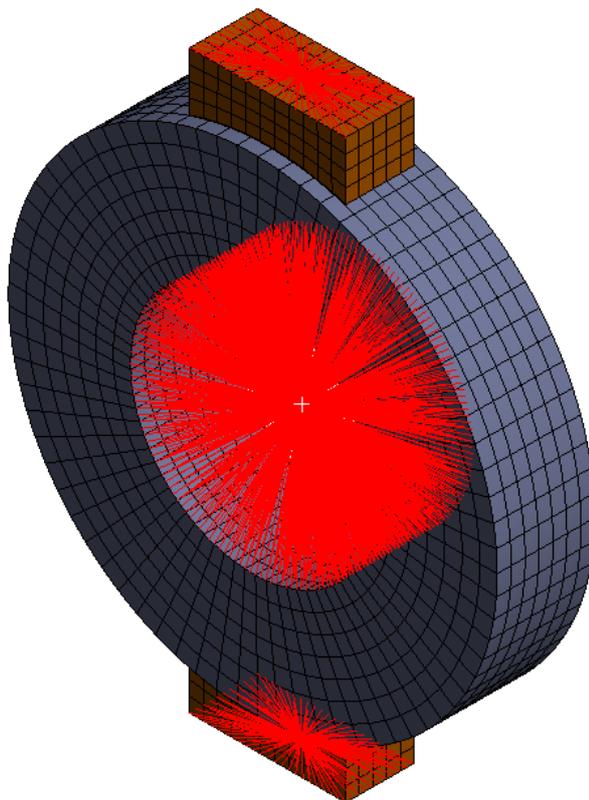


Рисунок 26 - Приложение граничных условий

К колодкам было приложено усилие на рисунке 25 представлена зависимость усилия, действующего на колодки от времени:

- На первом шаге нагружения прикладывается усилие по линейному закону от 0 до 500 Н;
- На втором шаге нагружения усилие, действующее на колодки, остается постоянным:

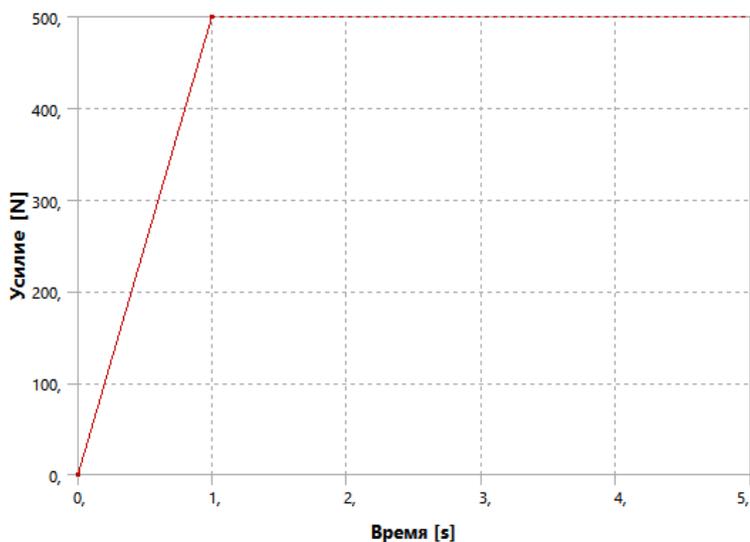


Рисунок 27 - График приложения усилия к колодкам

Вращение вала было задано следующим образом (рисунок 26):

- На первом шаге нагружения вращение отсутствует;
- На втором шаге нагружения вращение было задано по экспоненциальному закону от 0 до 52,36 рад/с;

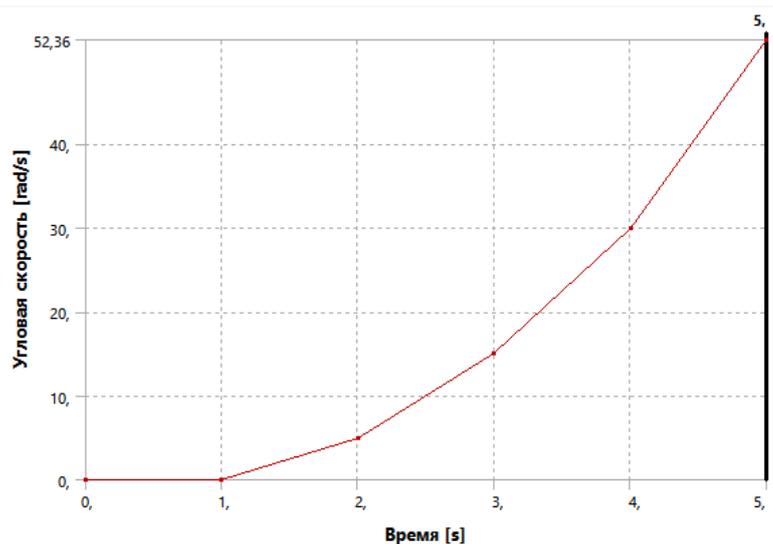


Рисунок 28 - Зависимость угловой скорости вала от времени

### 3.6 Настройка свойств анализа

Нелинейный динамический связанный тепломеханический анализ выполняется в два этапа нагружения. В анализе включена геометрическая нелинейность (Большие перемещения: Вкл.). А также используются автоматические приращения по времени.

В процессе моделирования положения контактных узлов во время износа может привести к изменению статуса контакта (открытый или закрытый). В случае если приращение износа слишком велико, все контактные элементы могут перейти из закрытого состояния в открытое, что приведет к появлению зазора между телами и как следствие к движению твердого тела. Чтобы предотвратить это, используется очень малое приращение по времени, так чтобы приращение износа на каждом подшаге расчета было невелико, а изменение статуса контакта затронуло не все контактные узлы. На рисунке представлены настройки свойств решателя.

Analysis Settings		
Properties	Step 1	Step 2
<b>Step Controls</b>		
Step End Time	1,	5,
Auto Time Stepping	On	On
Define By	Time	Time
Carry Over Time Step	N/A	Off
Initial Time Step	5,e-002	1,e-002
Minimum Time Step	1,e-002	1,e-003
Maximum Time Step	0,1	5,e-002
Time Integration	On	On
--Structural Only	On	On
--Thermal Only	On	On
<b>Nonlinear Controls</b>		
Force Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Heat Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Temperature Convergence	Program Controlled	Program Controlled
Line Search	Program Controlled	On
Stabilization	Program Controlled	Program Controlled
<b>Output Controls</b>		
Stress	Yes	Yes
Surface Stress	No	No
Back Stress	No	No
Strain	Yes	Yes
Contact Data	Yes	Yes
Nonlinear Data	No	No
Nodal Forces	No	No
Contact Miscellaneous	Yes	Yes
General Miscellaneous	No	No
Euler Angles	Yes	Yes
Volume and Energy	Yes	Yes
Calculate Thermal Flux	Yes	Yes
Heat Generation Rate	No	No
Store Results At	All Time Points	All Time Points
<b>Advanced</b>		
Contact Split (DMP)	Off	Off

Рисунок 29 – Настройка свойств анализа

### 3.7 Анализ результатов моделирования

#### Анализ влияния износа на контактное давление

Анализ результатов позволяет изучить влияния износа на условия контакта (контактное давление, контактную площадь), а также его влияние на напряженно-деформированное состояние в процессе динамического нагружения.

В данной модели в конце первого шага нагружения прикладывается статически усилие. Износ колодок активируется на втором шаге нагружения. На рисунке 29 представлена зависимость контактного давления от времени:

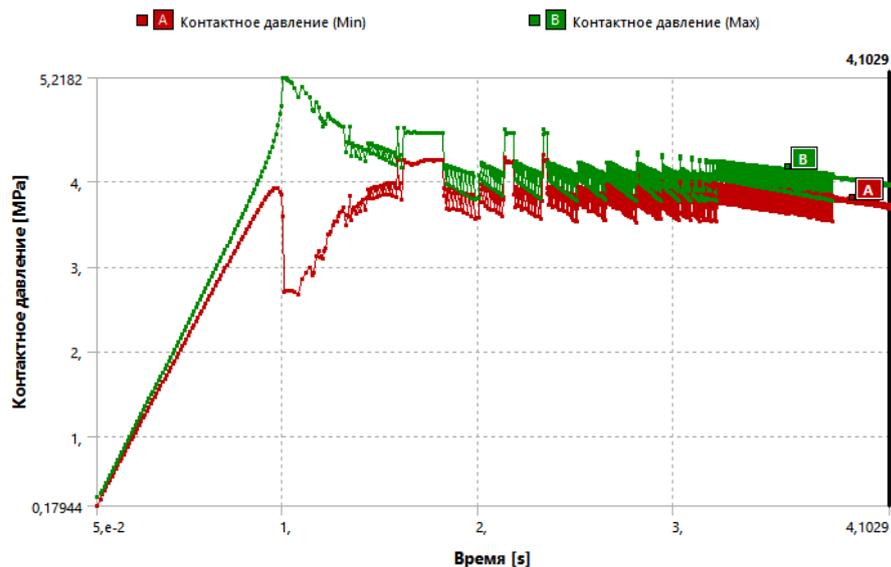


Рисунок 30 - Зависимость контактного давления в паре трения «вал-колодки»

Анализируя зависимость контактно давления от времени можно убедиться, что в результате износа контактное давление выравнивается так как значение максимального контактного давления приближается к значениям минимального. По зависимости контактного давления так же можно судить о величине приработке.

Распределение контактного давления в начале вращения вала показывает максимально нагруженные области колодки при врезании вала в колодки (рисунок 30).

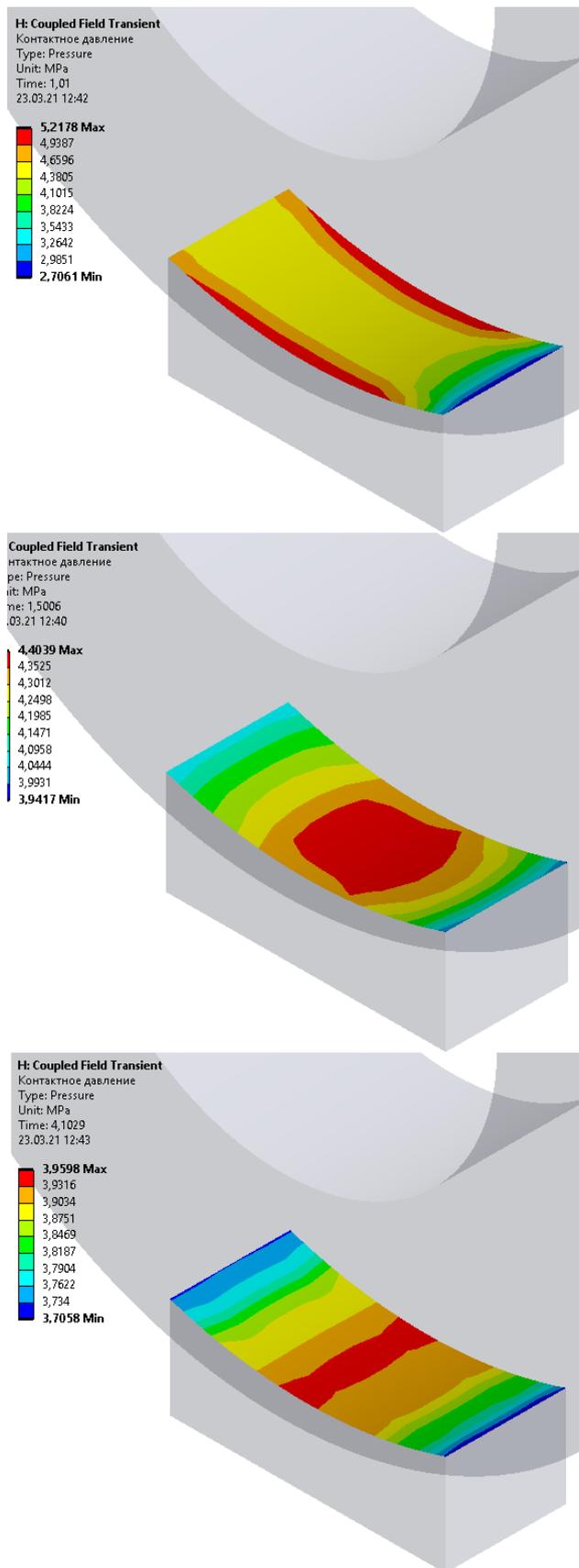


Рисунок 31 – Распределение контактного давления в начале вращения вала 1,01 с, в процессе разгона 1,5 с и при достижении рабочей скорости вращения

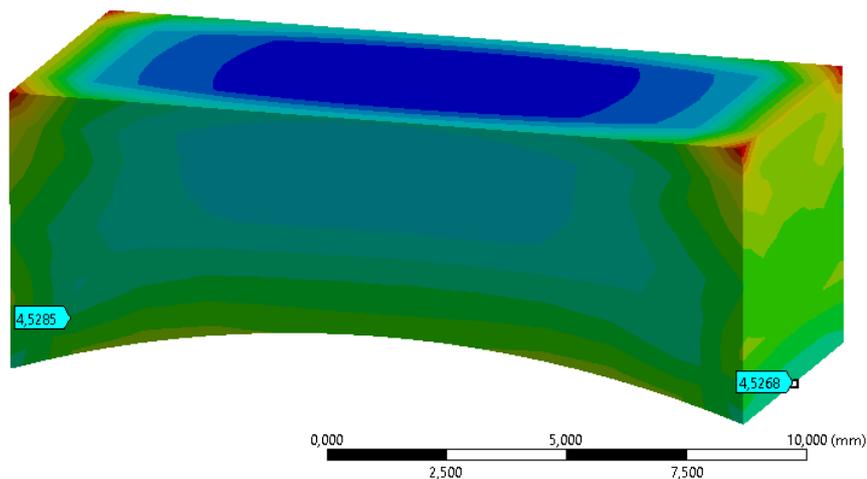
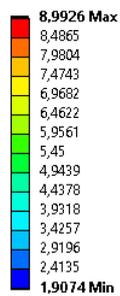
Так как степень износа пропорциональна контактному давлению, области в пределах изначально высокого давления изнашиваются более интенсивно, при этом изменяется кривизна поверхности колодки тем самым уменьшая контактное давление в этих областях. Это приводит к увеличению площади фактического контакта соприкасающихся колодок, что увеличивает контактное давление в областях, которые имели низкое контактное давление в начале износа. Изменение контактного давления хорошо продемонстрировано на рисунке 30.

#### **Анализ влияния износа на напряженное состояние пары трения «вал-колодки»**

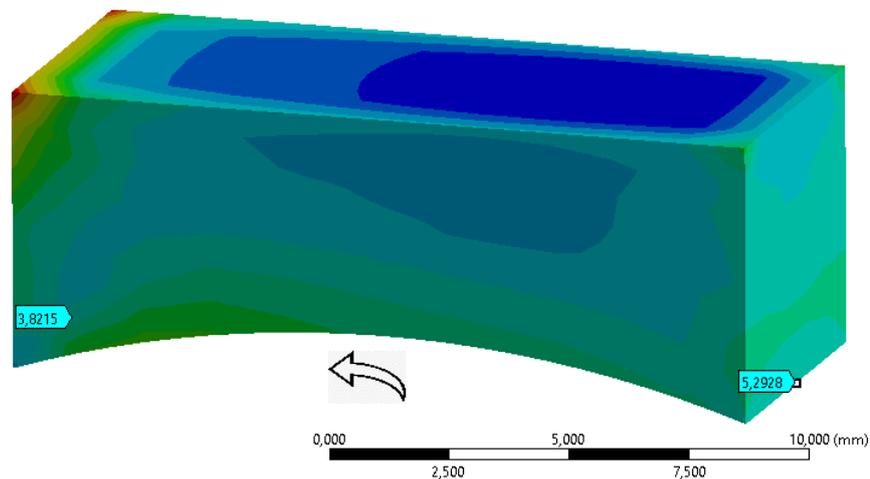
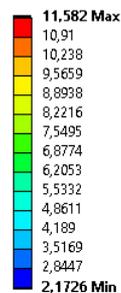
Анализируя результаты моделирования напряженного состояния колодки в процессе моделирования можно сказать следующее:

Напряженное состояние в конце первого шага нагружения симметрично так как отсутствует вращение. В начале вращения напряженное состояние смещается в результате самой нагруженной стороной колодки является сторона, по которой происходит врезание вала. В результате изнашивания контактной поверхности колодки напряженное состояние выравнивается что в свою очередь говорит об изменении площади фактического контакта так же, как и в случае с контактным давлением. На рисунке 31 представлено распределение напряженного состояния в колодке. Также по напряженному состоянию можно судить о прочности колодки в процессе работы.

**H: Coupled Field Transient**  
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
03.04.21 20:00



**H: Coupled Field Transient**  
Equivalent Stress 3  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1,01  
03.04.21 20:08



**H: Coupled Field Transient**  
Equivalent Stress 4  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 4,1029  
03.04.21 20:10

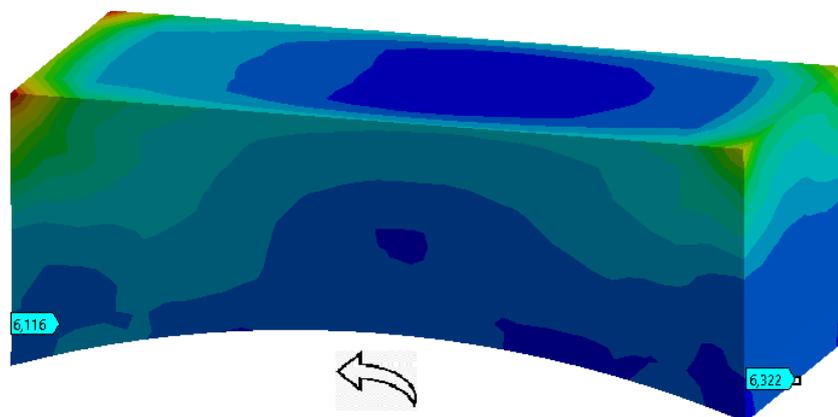
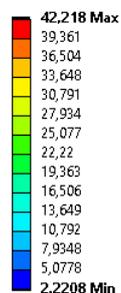


Рисунок 32 – Распределение напряженного состояния в колодке: в конце первого шага нагружения; в начале вращения вала; при достижении рабочей скорости вращения

**H: Coupled Field Transient**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 4,1029  
23.03.21 12:01

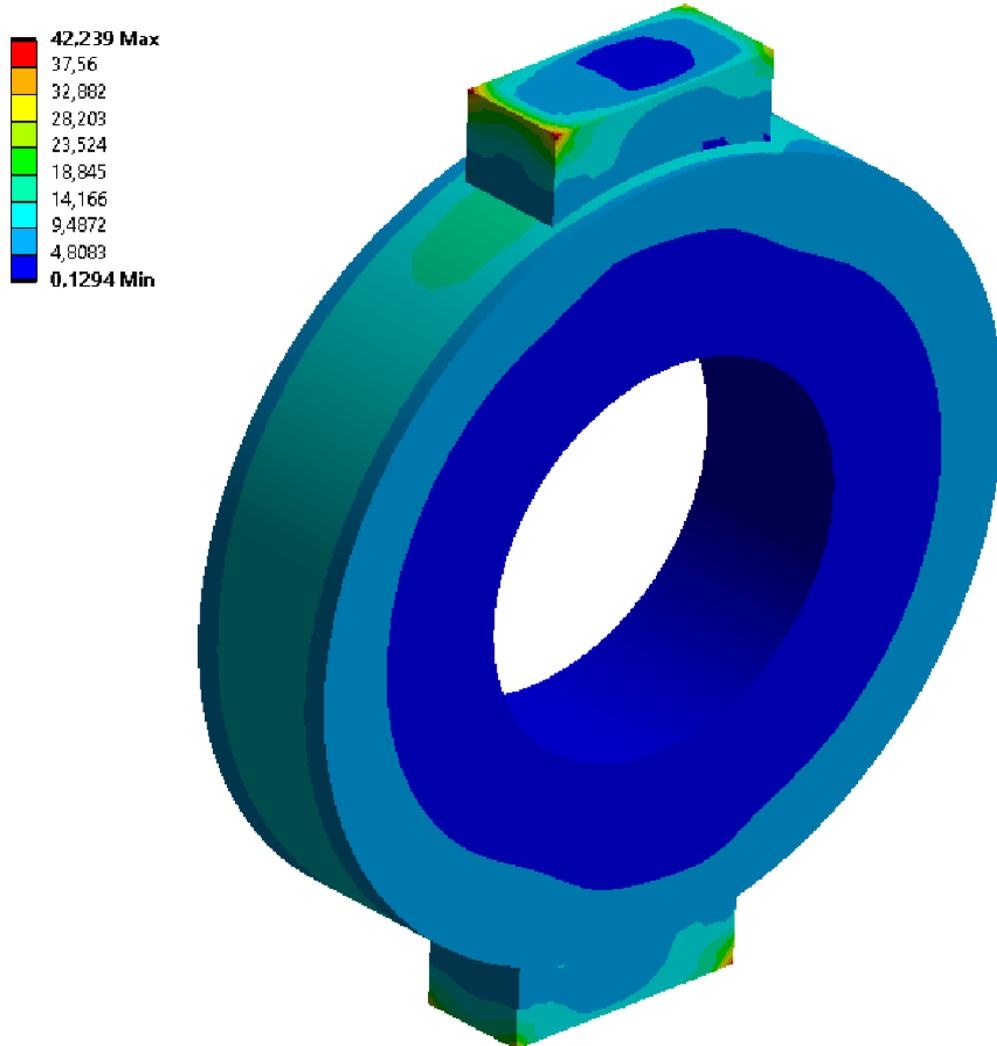


Рисунок 33 - Распределение эквивалентных напряжения по Мизесу

На рисунке 32 представлено распределение напряженного состояния в модели пары трения при достижении рабочей скорости вращения. Вал нагружен равномерно зачет его достаточно высокой скорости вращения.

#### **Анализ износа**

Для вывода износа в ANSYS Mechanical не предусмотрены специальные функции поэтому для вывода износа был использован User Defined Result, где с помощью команды CONTNMISC был выведен износ.

На рисунке 33 представлена зависимость объемного износа колодок от времени.

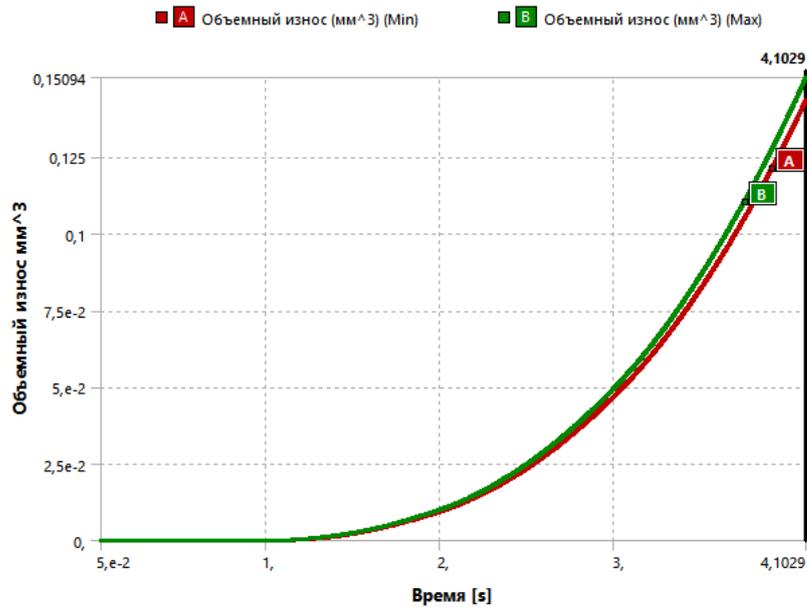


Рисунок 34 - Зависимость объемного износа колодки от времени.

Данная зависимость показывает объем потерянного материала вследствие износа.

Для подробного изучения распределения износа по контактной поверхности колодки были выведены результаты распределения износа на рисунке

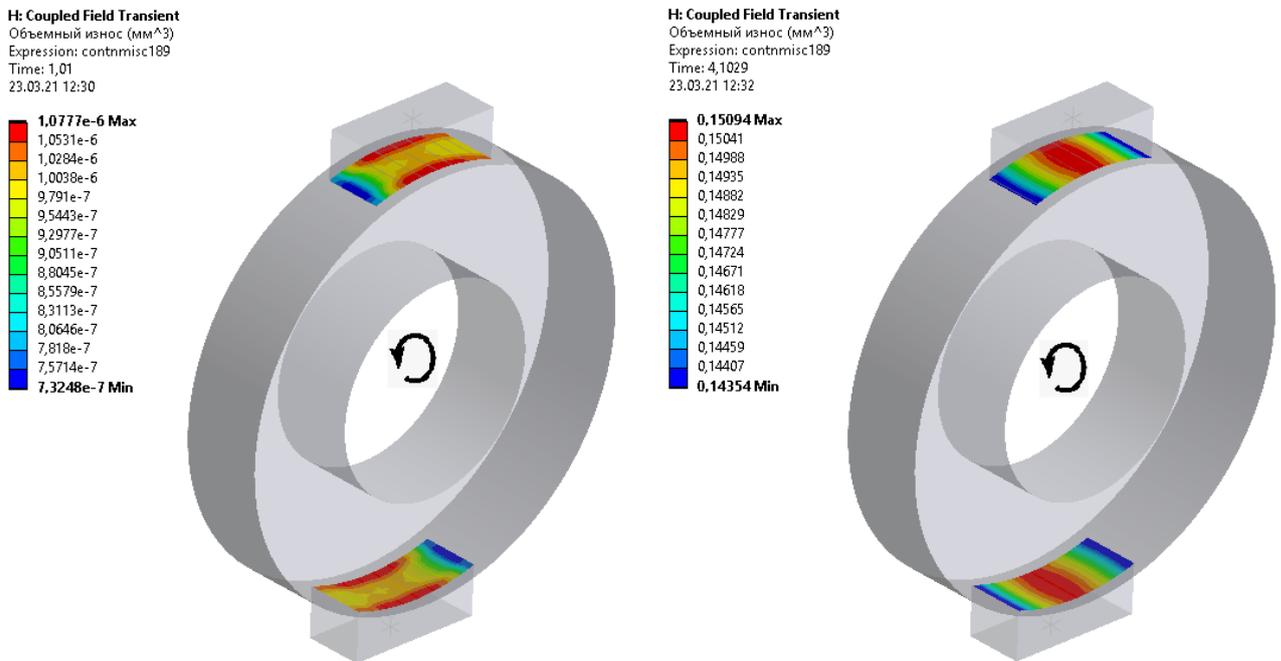


Рисунок 35 – Распределение износа: в начале вращения; при достижении рабочей скорости вращения

Как видно из рисунка 33 максимальный износ находится в месте максимального давления (рисунок 30). При достижении рабочей скорости вращения износ становится более равномерным по поверхности колодки что говорит и том, что колодка приработалась к валу.

### Нагрев в результате трения

Износ во время работы пары трения может зависеть не только от механических параметров таких как контактное давление и скорость относительного скольжения, но также и от температуры нагрева при трении. В данной работе для моделирования износа была использована встроенная в программу ANSYS модель износа Арчарда, которая не учитывает влияние температуры на износ. В качестве дальнейшего развития данной задачи возможно написание своей модели износа, учитывающей влияние температуры на износ.

Изменение температуры нагрева трением при разгоне вала представлено на рисунке 36. Анализ нагрева в зависимости от времени работы может показать до какой максимальной температуры может быть разогрета пара трения.

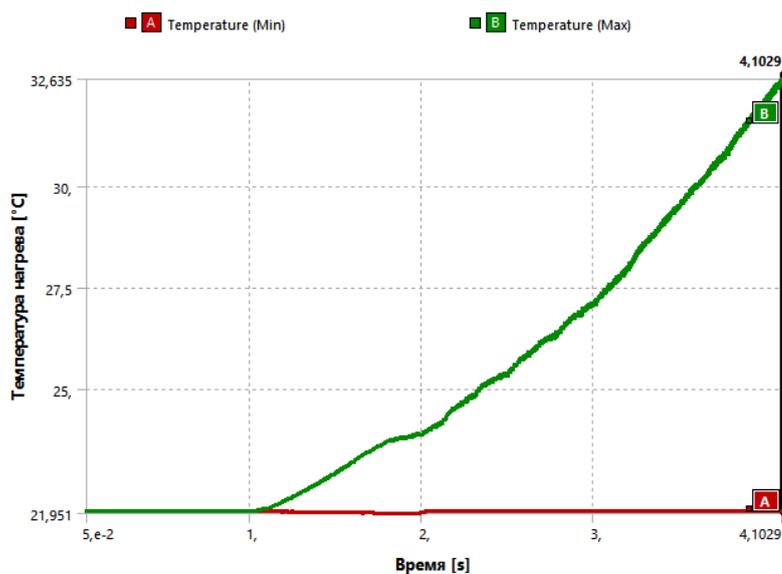


Рисунок 36 - Зависимость температуры нагрева колодок

Распределение полей температур представлено на рисунке 36

H: Coupled Field Transient  
Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 4,1029  
23.03.21 12:05

32,538 Max  
31,367  
30,197  
29,026  
27,855  
26,684  
25,513  
24,342  
23,171  
22 Min

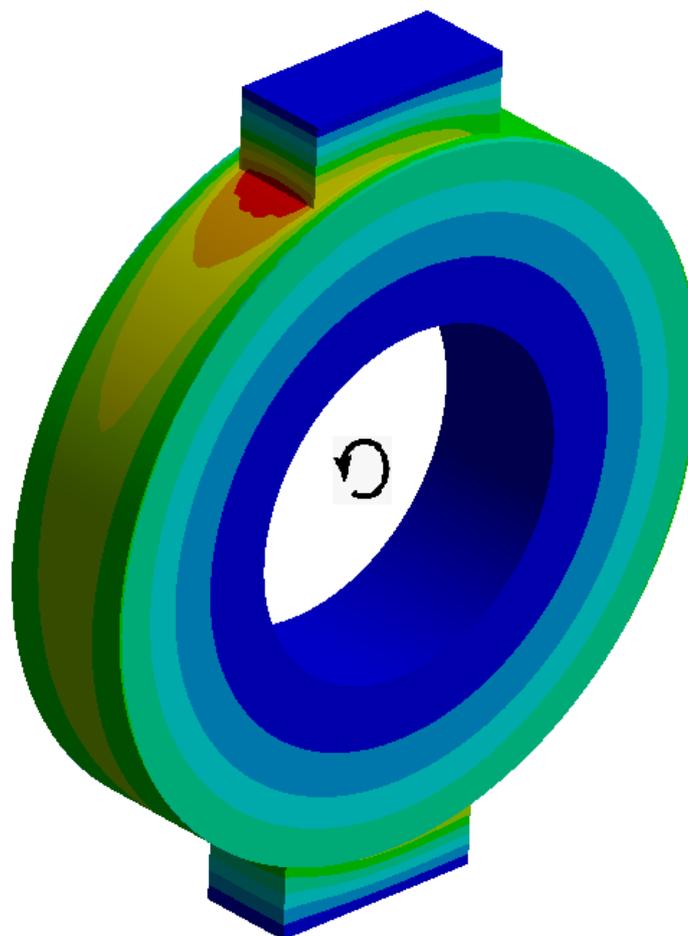


Рисунок 37 - Распределение температуры нагрева при достижении вала рабочей скорости вращения

Анализируя распределение температуры нагрева пары трения «вал-колодки» при достижении рабочей скорости вращения можно сказать следующее:

1. Температура нагрева неравномерно распределена по колодке это так же может быть причиной неравномерного износа колодок.
2. В случае полного изучения влияния температуры нагрева на износ колодке необходимо точно определить внешние температурные параметры, характеризующие испытательную камеру машины трения.

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

### 4.1 Предпроектный анализ

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потенциальных потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок. Данная научно-исследовательская работа, направлена на проведение компьютерного моделирования процесса изнашивания пары трения «вал-колодки» и может быть предназначена для промышленных компаний, занимающихся разработкой высокотехнологического оборудования. К основным потребителям можно отнести такие промышленные организации:

- производители автомобильной техники (узлы трения автомобиля, а также шины).
- производители аэрокосмической техники (технические системы в которых присутствуют узлы трения).
- производители судов и водного транспорта.
- производители нефтегазового оборудования.
- Производители металлообрабатывающих станков.

Таблица 3 - Список потенциальных предприятий потребителей результатов исследования

№	Наименование	Географическое положение
1	ООО «ТриБоСС»	Томская область, город Томск
2	АО «АвтоВАЗ»	Город Тольятти
3	АО «Омскшина»	Город Омск
4	ПАО «КАМАЗ»	Город Набережные Челны

ООО «ТриБоСС» многопрофильная научно-производственная фирма, специализирующаяся на исследованиях и разработке нестандартного оборудования и продукции различного назначения с использованием современных цифровых технологий. Свою деятельность компания выстраивает согласно интегрированному подходу к управлению информацией об изделии на всех этапах его жизненного цикла: от концептуального дизайна, разработки и производства до использования, обслуживания и вывода из эксплуатации.

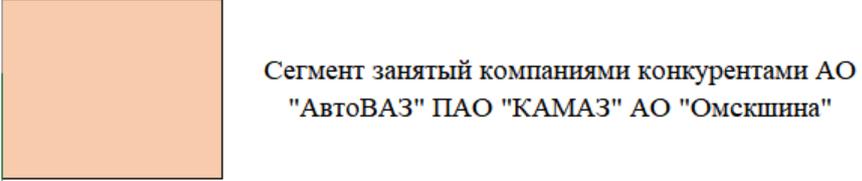
АО «АвтоВАЗ» крупнейший производитель легковых автомобилей в России и Восточной Европе. Основан в 1966 году, а городе Тольятти, где находится штаб-квартира и основное производство. Число сотрудников 34198 человек.

АО «Омскшина» известный производитель шин для грузовых автомобилей, автобусов и троллейбусов, а также для специальной техники. Ассортиментная линейка грузовых комбинированных шин состоит из 35 моделей в наиболее массовых типоразмерах. Высокий уровень технических характеристик продукции «Омскшина» позволяет эксплуатировать шины в сложных дорожных и климатических условиях.

ПАО «КАМАЗ» производитель дизельных грузовых автомобилей и дизелей, действующая с 1976 года. Выпускает автобусы, тракторы, комбайны, электроагрегаты, тепловые миниэлектростанции и комплектующие. Основное производство расположено в городе Набережные Челны. Число сотрудников 35730.

Карта сегментирования рынка представлена на рисунке 1

		Вид исследования
		Моделирование износа в паре трения "Вал-колодки"
Размер компании	Крупные	АО "АвтоВАЗ"
		ПАО "КАМАЗ"
	Средние	АО "Омскшина"
	Мелкие	ООО "ТриБоСС"

Сегмент занятый компаниями конкурентами АО "АвтоВАЗ" ПАО "КАМАЗ" АО "Омскшина"

Рисунок 38 - Карта сегментирования рынка

По построенной карте сегментирования рынка видно, что размеры компаний, сталкивающиеся с разработкой пар трения, разнообразны по размерам. Также видно, что в конкуренты занимают крупные и средние сегменты рынка. Имеется возможность внедрить подход к исследованию пар трения при разработке в мелкую компанию или же в крупную и среднюю, если преимущества разрабатываемого проекта выделяются на фоне конкурентов.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих программных комплексов для моделирования помогает выбрать оптимальный программный продукт для моделирования в научном исследовании. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

ANSYS – универсальный программный пакет конечно-элементного анализа, направленный на решение задач в различных областях инженерной деятельности (динамика и прочность конструкций, теплообмена, механика жидкости и газа, электромагнетизма), а также связанные междисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.). Основным решателем задач механики конструкций является ANSYS Mechanical APDL.

Для решения задач механики жидкости и газа в ANSYS присутствуют два основных решателя – Fluent и CFX. Каждый решатель имеет собственную оболочку.

Основной идеей программного комплекса ANSYS является объединение различных решателей и приложений в единой вычислительной среде. В современном ANSYS интегрировано множество решателей с различными наборами математических моделей физических процессов и численных методов. Главной платформой для обмена данными между компонентами и приложения является ANSYS Workbench.

Платформа Workbench позволяет представить расчетный проект в виде структуры, которая наглядно показывает последовательность выполненного расчета. Структурное представление расчета позволяет также систематизировать и хранить полученные результаты.

ABAQUS – программный комплекс в области конечно-элементного расчета на прочность, с помощью которого можно проводить точные вычисления конструкций в линейной и нелинейной постановке.

Abaqus, Inc. с 2005 года входит в компанию Dassault Systems. В дальнейшем предполагается создание новой среды моделирования SIMULIA, которая будет содержать решения компаний Dassault Systemes и Abaqus, Inc. в области прочностных расчетов, а также объединять лучшие решения третьих фирм для создания мощного инструментария проектирования и многодисциплинарного анализа конструкции.

COMSOL Multiphysics – универсальная программная платформа для компьютерного моделирования физических процессов методом конечных элементов. Для моделирования доступны модули междисциплинарного анализа. В состав программного комплекса входит среда для разработки пользовательских приложений.

Проведем данный анализ с применением оценочной карты, приведенной в таблице 2. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1. Где:  $B_{\phi}$  ( $K_{\phi}$ ) – баллы (конкурентоспособность) ANSYS,  $B_{K1}$  ( $K_{K1}$ ) и  $B_{K2}$  ( $K_{K2}$ ) – баллы (конкурентоспособность) ABAQUS и COMSOL.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i, \quad (11)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 4 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
3. Надежность	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
5. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
3. Цена	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	10	10	10	1	1	1
5. Послепродажное обслуживание	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
6. Финансирование научной разработки	0,04	5	4	4	0,16	0,16	0,16
7. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,16	0,16	0,16

Итого	1	34	33	32	1,5	1,4 6	1,41
-------	---	----	----	----	-----	----------	------

Основываясь на знаниях о конкурентах, можно объяснить следующее:

- Оценочная карта показывает, что используемое программное обеспечение является конкурентоспособнее, так как по некоторым показателям превосходит конкурентов;
- Основным техническим преимуществом использования программного комплекса ANSYS;
- Экономическое преимущество заключается в уменьшении времени подготовке модели для моделирования. По оценочной карте видно, что новое устройство является конкурентоспособным, так как по многим показателем превосходит своего конкурента.

#### **4.1.3 FAST-анализ**

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

#### **Выбор объекта FAST-анализа**

В качестве объекта FAST-анализа выступает программный комплекс для моделирования.

**Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом**

В рамках данной стадии FAST-анализа объект анализируется с позиции функционального устройства. Классификация функций, выполняемых объектом исследования представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Классификация функций, выполняемых программным комплексом

Наименование детали (узла, процесса)	Количество во деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Моделирование износа пары трения		Построенная модель необходима для анализа износа и оптимизации конструкции пары трения	X		
Построение геометрической модели пары трения «Вал-колодки»	-	По заданным геометрическим размерам для пары трения «Вал-колодки» строится 3d модель			X
Построение конечно элементной	-	Построенная ранее геометрическая		X	

модели		модель разбивается на конечные элементы			
Задание контактов и их свойств	-	Определения контакта для построения сетки конечных элементов на контактных поверхностях		X	
Задание нагрузок и граничных условий	-	Определение граничных условий для модели и приложение соответствующ их нагрузок		X	
Расчет	-	Решение задачи		X	
Обработка результатов	-	Построение графиков. Полей напряжений, перемещений и температур		X	

**Определение значимости выполняемых функций объектом**

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенной Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

Построим матрицу смежности (таблица 6).

Таблица 6 - Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7
Функция 1	=	<	<	<	<	<	<
Функция 2	>	=	<	<	<	<	<
Функция 3	>	>	=	>	<	<	<
Функция 4	>	>	<	=	>	>	<
Функция 5	>	>	>	<	=	>	<
Функция 6	>	>	>	<	<	=	<
Функция 7	>	>	>	>	>	>	=

Преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 7).

Таблица 7 - Матрица количественных соотношений функций

	Функц ия 1	Функц ия 2	Функц ия 3	Функц ия 4	Функц ия 5	Функц ия 6	Функц ия 7	ИТОГ О
Функц ия 1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4
Функц ия 2	1,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	5
Функц ия 3	1,5	1,5	1	1,5	0,5	0,5	0,5	7
Функц ия 4	1,5	1,5	0,5	1	1,5	1,5	0,5	8
Функц ия 5	1,5	1,5	1,5	0,5	1	1,5	0,5	8
Функц ия 6	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1	0,5	7
Функц ия 7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	10
								$\Sigma = 49$

Определим значимости функций (таблица 8).

Таблица 8 - Определение значимости функций

Наименование функции	Относительная значимость
Функция 1	0,08
Функция 2	0,1

Функция 3	0,14
Функция 4	0,16
Функция 5	0,16
Функция 6	0,14
Функция 70,2	0,2
	$\sum = 1$

### Анализ стоимости функций, выполняемых объектом

Оценим уровень затрат на выполнение каждой функции. Сделать это возможно с помощью применения нормативного метода. Расчет стоимости функций приведен в таблице 10.

Таблица 9 - Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Моделирование износа пары трения	-	Построенная модель необходима для анализа износа и оптимизации конструкции	-	0,5	-	10000	-

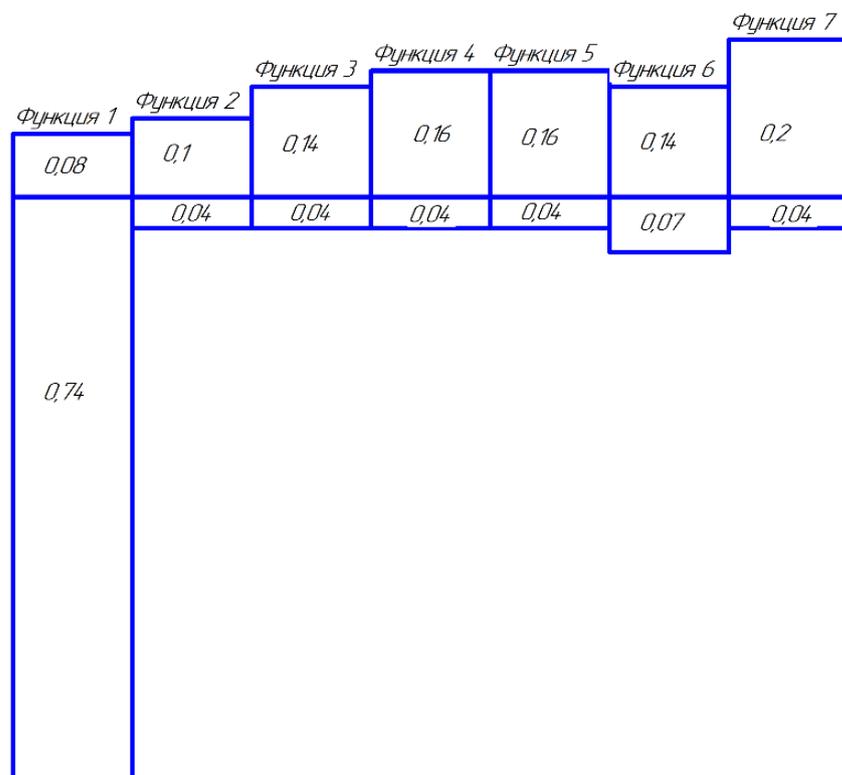
		пары трения					
Построение геометрической модели		По заданным геометрическим размерам для пары трения «Вал-колодки» строится 3d модель				500	
Построение конечно элементной модели	-	Построенная ранее геометрическая модель разбивается на конечные элементы	-	0,5	-	500	500
Задание контактов и их свойств	1	Определения контакта для построения сетки конечных элементов на контактных поверхностях	-	0,5	-	500	500
Задание нагрузок и граничных условий	-	Определение граничных условий для модели и приложение соответствующих	-	0,5	-	500	500

		нагрузок					
Расчет	4	Решение задачи	-	10	-	1000	1000
Обработка результатов	4	Построение графиков и полей напряжений, перемещений и температур	-	0,6	-	500	500

### Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 4).

#### *Относительная значимость функции*



#### *Относительные затраты функции*

Рисунок 39 - Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью (полезностью) функций и затратами на них. Анализ приведенной выше ФСД показывает наличие рассогласования по функциям 1, 2, 3, 4, 6. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

### **Оптимизация функций, выполняемых объектом**

В качестве конкретных шагов, которые необходимо предложить на данном этапе, должны выступать предложения, связанные с экономией за счет:

- Создание приложения для автоматизации моделирования;

В конечном счете результатом проведения FAST-анализа высокотехнологической и ресурсоэффективной разработки должно быть снижение затрат на единицу полезного эффекта, достигаемое путем:

- сокращения затрат при одновременном повышении потребительских свойств объекта;
- повышения качества при сохранении уровня затрат;
- уменьшения затрат при сохранении уровня качества;
- сокращения затрат при обоснованном снижении технических параметров до их функционально необходимого уровня;
- повышения качества при некотором, экономически оправданном увеличении затрат.

#### **4.1.4 SWOT-анализ**

SWOT-анализ – комплексный анализ научно-исследовательского проекта, который позволяет определить сильные и слабые стороны научно-исследовательской работы, а также анализ возможностей возникающих в условиях окружающей среды положительно влияющей на конкурентную позицию и угроз которые имеют разрушительный или угрожающий характер для конкурентоспособности проекта в настоящем и будущем.

На первом этапе проведем описание сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились

или могут проявиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT-анализа приведены таблице 10.

Таблица 10 - Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Прогнозирование износа узлов трения.</p> <p>С2. Новые возможности по оптимизации конструкции трибосопряжения.</p> <p>С3. Сокращение числа натуральных испытаний узлов трения.</p> <p>С4. Востребованность исследований (переход к Индустрии 4.0).</p> <p>С5. Возможность получения финансирования научно-исследовательского проекта.</p> <p>С6. Экологичность технологии.</p>	<p>Сл1. Большие вычислительные мощности для проведения моделирования.</p> <p>Сл2. Отсутствие необходимого оборудования в ТПУ или его недоступность.</p> <p>Сл3. Конкуренция со стороны зарубежных компаний.</p> <p>Сл4. Отсутствие в ТПУ необходимых программных пакетов или их недоступность.</p>

<p>Возможности:</p> <p>В1. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В2. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В3. Взаимодействие с производителями триботехники, смазочных материалов, присадок.</p> <p>В4. Взаимодействие с научными сотрудниками и научными группами из других университетов.</p> <p>В5. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p>		
<p>Угрозы:</p>		

У1. Отсутствие спроса результаты исследований.		
У2. Увеличение конкуренции при проведении научных исследований.		
У3. Нестабильное финансирование научно- исследовательского проекта.		

На втором этапе выявим соответствие сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условия окружающей среды. Это должно помочь выявить необходимость стратегических изменений. Построим интерактивные матрицы проекта.

Таблица 11 - Интерактивная матрица для сильных сторон и возможностей

	Сильные стороны						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Возможности	B1	+	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+	+	+
	B4	+	0	+	+	+	+
	B5	+	+	+	+	+	+

Таблица 12 - Интерактивная таблица для слабых сторон и возможностей

	Слабые стороны				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности	В1	+	+	+	+
	В2	+	0	+	0
	В3	-	-	-	-
	В4	+	+	+	0
	В5	+	+	+	+

Таблица 13 - Интерактивная таблица для сильных сторон и угроз

	Сильные стороны						
		С1	С2	С3	С4	С5	С6
Угрозы	У1	-	-	-	-	+	-
	У2	+	+	+	+	+	+
	У3	+	+	+	+	+	+

Таблица 14 - Интерактивная таблица для слабых сторон и угроз

	Слабые стороны				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Угрозы	У1	+	-	-	-
	У2	+	0	+	0
	У3	+	+	+	+

На третьем этапе составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 6).

Таблица 15 - Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Прогнозирование износа узлов трения.</p> <p>С2. Новые возможности по оптимизации конструкции трибосопряжения.</p> <p>С3. Сокращение числа натуральных испытаний узлов трения.</p> <p>С4. Востребованность исследований (переход к Индустрии 4.0).</p> <p>С5. Возможность получения финансирования научно-исследовательского проекта.</p> <p>С6. Экологичность технологии.</p>	<p>Сл1. Большие вычислительные мощности для проведения моделирования.</p> <p>Сл2. Отсутствие необходимого оборудования в ТПУ или его недоступность.</p> <p>Сл3. Конкуренция со стороны зарубежных компаний.</p> <p>Сл4. Отсутствие в ТПУ необходимых программных пакетов или их недоступность.</p>
Возможности:	Есть возможность работы с	Для проведения

<p>В1. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В2. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В3. Взаимодействие с производителями триботехники, смазочных материалов, присадок.</p> <p>В4. Взаимодействие с научными сотрудниками и научными группами из других университетов.</p> <p>В5. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p>	<p>компаниями, занимающимися разработкой в области триботехники, смазочных материалов, присадок. На сегодняшний день есть большие перспективы для разработки новых образцов трибосопряжения.</p> <p>Взаимодействие с научными сотрудниками и научными группами других университетов позволит повысить эффективность проекта что повлечет за собой дополнительный спрос на новый продукт</p>	<p>компьютерного моделирования могут быть задействованы вычислительные мощности ТПУ или других организаций, заинтересованных в результатах исследования. Создание или приобретение оборудования для проведения натурных испытаний может быть профинансировано ТПУ или заинтересованными организациями.</p> <p>Точное определение сегмента рынка позволит избежать потерь за счет конкуренции.</p> <p>Необходимо программное обеспечение может быть предоставлено ТПУ или заинтересованными в результатах исследований промышленными организациями</p>
---	---	---

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на результаты исследований.</p> <p>У2. Увеличение конкуренции при проведении научных исследований.</p> <p>У3. Нестабильное финансирование научно-исследовательского проекта.</p>	<p>Исследование может быть переориентировано на разработку трибосопряжения для другой отрасли промышленности.</p>	<p>Использование вычислительных мощностей ТПУ позволит повысить эффективность проекта. Для привлечения дополнительного финансирования проекта необходимо участие в научно-практических конференциях что позволит повысить известность проекта.</p>
--	---	--

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

#### 4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 9.

Таблица 16 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№	Наименование	Степень	Уровень
---	--------------	---------	---------

п/п		проработанности научного проекта	имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	5
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	5	4

10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>57</b>	<b>62</b>

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю составляем оценку по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. При оценке степени проработанности научного проекта: 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта.

Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4

– знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i, \quad (12)$$

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (13)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$  – му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Перспективность данной разработки можно считать выше среднего, так как  $B_{\text{сум}}$  получилось от 57 до 45.

## 4.2 Инициация проекта

### 4.2.1 Цели и результат проекта

В качестве максимальной стоимости исполнения научно-исследовательского проекта принимаем минимальный размер гранта на выполнение фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными - кандидатами наук в научных организациях РФ, так как аналогичные научные исследования ранее не проводились.

Таким образом, эскалация важности научных грантов вызвана с их экономическим значением, поскольку в первую очередь они служат специальным механизмом финансирования исследований, который играет жизненно важную роль для научных сообществ. Задача грантовой поддержки научных исследований была сформулирована в Стратегии инновационного

развития Российской Федерации на период до 2020 года. Помимо этого, федеральный закон «О науке и государственной научно-технической политике» закрепил цель государственной научно-технической политики, а именно: «развитие, рациональное размещение и эффективное использование научно-технического потенциала, увеличение вклада науки и техники в развитие экономики государства, реализации важнейших социальных задач, преобразование материального производства и интеграция науки и образования».

Таблица 17 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Томский политехнический университет	Моделирование износа динамически нагруженной пары трения при вращательном движении исполнительного органа
Заказчик работы: ООО «ТриБоСС»	Качество, цена и работоспособность

Таблица 18 - Цели и результат проекта

Цели проекта:	Целью проекта является исследование и моделирование сложного динамического нагружения пары трения скольжения при вращательном движении исполнительного органа, а также в сравнении со статическим нагружением.
Ожидаемые результаты проекта:	Разработка методики моделирования износа динамически нагруженной пары трения при вращательном

	движении исполнительного органа
Критерии приемки результата проекта:	Расход ресурсов — не более установленного лимита.
Требования к результату проекта:	Построенная модель должна позволять анализировать основные параметры пары трения в процессе ее работы, а также обеспечивать соответствие экспериментатор полученным результатам.

#### 4.2.2 Организационная структура проекта

Таблица 19 - Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Шеповалов И.М., ТПУ, магистрант	Исследователь	Разработать методику исследования; Анализ перспективности; Формирование бюджета; Определение эффективности;	115 дн.
2	Буханченко С. Е., ТПУ, доцент	Руководитель	Составление индивидуального задания и плана выполнения ВКР с конкретизацией срока сдачи материала на	29 дн.

			проверку; давать рекомендации по ходу и содержанию проекта; проверка ВКР на соответствие установленным требованиям; координировать деятельность участников проекта; оценить качеству работы исследователя.	
ИТОГО:				144 дн.

### 4.2.3 Ограничения и допущения проекта

Таблица 20 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта	2000000 руб.
Источник финансирования	Государственный бюджет
Сроки проекта	6 месяцев
Дата утверждения плана управления проектом	24.02.21

Дата завершения проекта	16.06.21
Прочие ограничения и допущения*	Затраты по оплате труда – не более 600000 руб.

## 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения данного научного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и исследователь. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы. Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 10.

Таблица 21 - Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
1	2	3	4
Выбор темы исследований	1	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, исследователь
	2	Выбор алгоритма исследований	Руководитель
	3	Подбор и изучение литературы по теме	Исследователь
Разработка тех. Задания	4	Составление и утверждение тех. Задания	Руководитель
Теоретические и экспериментальные	5	Определение модели для моделирования	Руководитель,

исследования			Исследовате ль
	6	Построение математической модели пары трения	Исследовате ль
	7	Моделирование динамического нагружения пары трения	Исследовате ль
	10	Анализ результатов моделирования	Исследовате ль
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка результатов исследования	Руководите ль, исследовате ль
	13	Исследование математической модели	Исследовате ль
	14	Технико-экономические расчеты	Исследовате ль
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Исследовате ль
Оформление отчета	16	Заполнение пояснительной записки	Исследовате ль

### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для выполнения перечисленных в таблице 3.5 работ требуются специалисты: студент в качестве инженера и научный руководитель.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (14)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (15)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot K_{кал}, \quad (16)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (17)$$

где  $T_{кал} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{вых} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{пр} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,477.$$

По полученным данным, коэффициентам и формулам выполним расчеты для каждой работы. Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округляем до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблице 22

Таблица 22 - Временные показатели проведения научного исследования

Название	Трудоемкость работ	Длительность работ в	Длительность работ в
		ть работ в	ь работ в

работы	$t_{min}$ , Чел-дни		$t_{max}$ , Чел-дни		$t_{ож}$ , Чел-дни		рабочих дней, $T_{pi}$		колендарных дней, $T_{ki}$	
	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь	Руководитель	Исследователь
Календарное планирование работ по теме	3	3	6	6	5,6	5,6	3	3	5	5
Выбор алгоритма исследования	4	-	8	-	5,6	-	6	-	9	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	10	-	15	-	12	-	12	-	18
Составление и утверждение тех. Задания	6	-	15	-	9,6	-	10	-	15	-
Определение модели для моделирования	2	2	3	3	2,4	2,4	1	1	2	2
Построение математической модели пары трения	-	9	-	18	-	13	0	13	0	19
Моделирование динамического нагружения пары трения	-	20	-	40	-	28	-	28	-	42

Анализ результатов моделирования	-	5	-	15	-	9	-	9	-	14
Оценка результатов исследования	1	1	1	1	1	1	6	1	9	2
Исследование математической модели	2	5	8	10	4,4	7	2	4	3	6
Технико-экономические расчеты	-	3	-	4	-	3,4	-	3	-	5
Составление пояснительной записки	-	12	-	16	-	14	-	14	-	20
Заполнение пояснительной записки	-	2	-	4	-	2,8	-	3	-	5
Итого									29	115

Из таблицы 15 видно, что наибольшее количество задач будет направлено на выполнение исследователю. Работа научного руководителя заключается в консультации исследователя по вопросам моделирования, а также определением графика выполнения проекта вместе с исследователем. После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта, в таблице 12.

Исполнитель	$T_{ки}$ , кал.дни	Продолжительность выполнения работ														
		Февраль		Март			Апрель			Май			Июнь			
		2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Руководитель	5	■														
Исследователь	5	■														
Руководитель	5	■														
Исследователь	18	■	■	■												
Руководитель	15			■	■											
Руководитель	2					■										
Исследователь	2					■										
Исследователь	19					■	■	■								
Исследователь	42							■	■	■	■	■				
Исследователь	14									■	■	■				
Исследователь	9												■			
Руководитель	2												■			
Исследователь	3												■			
Руководитель	6												■			
Исследователь	5												■			
Исследователь	20												■	■	■	
Исследователь	5														■	



Рисунок 40 - Диаграмма Ганта

### 4.3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НИ следует в первую очередь отметить, что не все из упомянутых в статьях будут реализовываться в рамках данного проекта. Список расходов, подлежащих расчёту, имеет следующий вид:

- материальные затраты проекта;
- затраты на оборудование;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### Расчет материальных затрат НИИ

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. Поэтому необходимо учитывать материальные затраты. В

данной работе в материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, картридж для лазерного принтера.

Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 13.

Таблица 23 - Результаты расчётов по затратам на материалы

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество, ед.	Суммарная стоимость, руб.
Ручка шариковая Brauberg масляная автоматическая Тоне, корпус тонированный, 0,7 мм, линия 0,35 мм, синяя	30	2	60
Тетрадь в клетку 96 листов	100	2	200
Бумага International Paper Svetocopy A4 500л./белый	247	2 уп.	494
CD-RW 500 Мб	70	2	140
Всего за материалы, руб.			894
Транспортно – заготовительные расходы, руб.			500
Итого по статье, руб.			1394

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения НИ.

Таблица 24 - Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Количество, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	ПК HP Slim S01-pF1010ur [Intel Core i3 10100, 4x3600 МГц, 8 ГБ DDR4, SSD 256 ГБ, Wi-Fi,	1	2	31990	31990
2	23.8" Монитор ASUS VA249HE [90LM02W1-B02370]	1	2	8550	8550
	Клавиатура+мышь Smartbuy SBC-206368AG-K	1	2	999	999
	Принтер лазерный HP	1	3	6999	6999

Laser 107a [черно-белая печать, А4, 1200x1200 dpi, ч/б - 20 стр/мин (А4), USB 2.0]				
Итого	48538 руб.			

Стоимость лицензионного программного обеспечения:

Таблица 25 - Затраты на лицензионное программное обеспечение

ANSYS Mechanical 2021 R1	250000 руб.
--------------------------	-------------

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов. При выполнении научно-исследовательского проекта использовался ноутбук НР. Срок полезного использования данного ноутбука по паспорту составляет 3 года.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (18)$$

где  $n$  – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m, \quad (19)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;

$m$  – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для компьютера, с учётом того, что срок полезного использования составляет 2 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Для ПК:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot m = \frac{0.5 \cdot 31990}{12} \cdot 2 = 2665.83 \text{ руб}$$

Для монитора:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot m = \frac{0.5 \cdot 8550}{12} \cdot 2 = 712.5 \text{ руб}$$

Для клавиатуры и мыши:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot m = \frac{0.5 \cdot 999}{12} \cdot 2 = 83.25 \text{ руб}$$

Для принтера:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0.33$$

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot m = \frac{0.33 \cdot 6990}{12} \cdot 3 = 576.66 \text{ руб}$$

### **Основная заработная плата**

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n} \tag{20}$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (21)$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл.

11).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10.4}{223} = 2391.76$$

где  $Z_m$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 15);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 48 раб. дня  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя исследователя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11.2}{119} = 3120$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = 21547.22 \cdot (1 + 0.3 + 0.2) \cdot 1.3 = 42017.1 \text{ руб.}$$

Для исследователя:

$$Z_m = 14000 \cdot (1 + 0.3 + 0.2) \cdot 1.3 = 27300 \text{ руб.}$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 26 - Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исследователь
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	104/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	24/0	48/0
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	119

Таблица 27 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\sigma}$ , руб.	$k_{np}$	$k_{д}$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	21547,22	0,3	0,2	1,3	42017,1	2391,76	29	69361.3
Исследователь	14000	0,3	0,2	1,3	27300	3120	115	358800
Итого:								428161.3

### Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии выполнения НИ принимаем равным 0,15).

Для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 0.15 \cdot 69361.3 = 10404.2 \text{ руб.}$$

Для исследователя:

$$З_{\text{доп}} = 0.15 \cdot 358800 = 53820 \text{ руб.}$$

### **Отчисления на социальные нужды**

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} \cdot З_{\text{доп}}) \quad (22)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Для руководителя:

$$С_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (69361.3 + 10404.2) = 23929.65 \text{ руб.}$$

Для исследователя:

$$С_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (358800 + 53820) = 123786 \text{ руб.}$$

### **Накладные расходы**

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} \cdot З_{\text{доп}}) \quad (23)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

$З_{\text{р}}$  - затраты на ремонт;

$З_{\text{эл.об}}$  - затраты на электроэнергию;

$З_{\text{кл}}$  - затраты на клининговые услуги;

$З_{\text{о}}$  - затраты на отопление;

$Z_{\text{мат}}$  - затраты на материальную помощь;

$Z_{\text{дз}}$  - непредвиденные затраты.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (2000 + 4000 + 10000 + 40000 + 60000 + 45000) = 25\,760 \text{ руб.}$$

Таблица 28 - Группировка затрат по статьям

Наименование статьи	Сумма, руб.
Сырье, материалы	1394
Специальное оборудование	48538
Лицензионное программное обеспечение	250000
Амортизация	4038,24
Основная заработная плата	428161,3
Дополнительная заработная плата	64224,2
Отчисление на социальные нужды	147715,65
Накладные расходы	25760
Бюджетные затраты НИИ	969831,4

По таблице 27 построим диаграмму бюджета НИИ по которой видно, что три самых крупных расхода по проекту связаны с выплатой заработной платы, приобретением лицензионного программного обеспечения, социальных фондов и общих расходов. Таким образом, затраты на исследование составили  $C = 969831,4$  руб.



Рисунок 41 - Диаграмма бюджета НТИ

#### 4.4 Определение ресурсоэффективности научного исследования

Определение сравнительной эффективности исследования проводят для текущего проекта и для аналогов.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (24)$$

где  $I_{\Phi}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Для текущего проекта:

$$I_{\Phi}^p = \frac{969831,4}{1000000} = 0,97$$

Для аналога 1.

$$I_{\Phi}^p = \frac{1000000}{1000000} = 1$$

Для аналога 2.

$$I_{\Phi}^p = \frac{980000}{1000000} = 0,98$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности можно вычислить по формуле:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad (25)$$

где  $I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  - бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки,

устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n - число параметров сравнения;

Аналог 1: ПЛМ Урал – компания, специализирующая на внедрении передовых CAD/CAE/CAM/CAI/PLM решений, предназначенных для цифрового сопровождения изделия на всех этапах его жизненного цикла. Компания оказывает услуги по консалтингу и реализации проектов внедрения, обучению работе в программном обеспечении, выполнению инженерных расчетов, разработке управляющих программ для станков с ЧПУ, осуществляет гарантийный и послегарантийный ремонт, калибровку и поверку координатно-измерительных машин.;

Аналог 2: ООО Тесис - инжиниринговая компания ТЕСИС создана в 1994 году, сейчас является одним из ведущих российских разработчиков и поставщиков инженерных решений для промышленных предприятий, исследовательских организаций, ВУЗов. Компания ТЕСИС предлагает комплексные решения по современному оснащению и автоматизации конструкторских, расчетных и технологических подразделений во всех отраслях промышленности. Наряду с лучшими в своих областях программными продуктами ведущих фирм мира, компания ТЕСИС предлагает собственные программные продукты, отвечающие новизной и высоким уровнем исполнения.

Таблица 29 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

	Весовой коэффициент параметров	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	5	5
Удобство в эксплуатации	0,1	5	5	5

(соответствует требованиям потребителей)				
Экономичность производства	0,1	5	4	4
Надежность	0,25	5	4	5
Энергосбережение	0,25	5	4	5
Материалоемкость	0,1	4	4	4
Безопасность	0,1	5	5	5
Итого	1	4,9	4,3	4,8

$$I_{\text{ТП}} = 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 = 4,9$$

$$I_{\text{АН1}} = 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 = 4,3$$

$$I_{\text{АН2}} = 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 = 4,8$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{\text{финр}}^p$  и аналога

$I_{\text{финр}}^a$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}, \quad (26)$$

Для текущего проекта:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,9}{0,97} = 5,05$$

Для аналога 1:

$$I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{4,3}{1} = 4,3$$

Для аналога 2:

$$I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{4,8}{0,98} = 4,89$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} \quad (27)$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта

$$\mathcal{E}_{cp(ТП)} = \frac{5,05}{5,05} = 1$$

$$\mathcal{E}_{cp(АН1)} = \frac{4,3}{5,05} = 0,85$$

$$\mathcal{E}_{cp(АН2)} = \frac{6,31}{6,81} = 0,97$$

Таблица 30 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,97	1	0,98
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,9	4,3	4,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,05	4,3	4,89
4	Сравнительная эффективность вариантов	1	0,85	0,97

	исполнения			
--	------------	--	--	--

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. По результатам проведенного анализа конкурентных технических решений можно отметить, что моделирование износа пары трения в текущем проекте является наиболее предпочтительнее и рациональнее, по сравнению с остальными;

2. По результатам FAST-анализа можно сделать вывод о возможной дальнейшей оптимизации моделирования;

3. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя, консультанта и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 125 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал исследователь – 115, общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 29;

4. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 969831,4 руб.;

5. По интегральным финансовым показателям можно отметить, что данное научное исследование эффективно.

Все, вышеперечисленные технико-экономические показатели проекта, позволяют сделать вывод о том, что текущая конструкция линейного пробоотборника экономически эффективна.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **Введение**

Объектом исследования является модель пары трения «вал - колодки». В данном разделе рассматриваются вопросы, связанные с организацией рабочего места инженера исследователя в соответствии с нормами производственной санитарии, экологической и пожарной безопасности и охраны окружающей среды.

Цель раздела: выявление возможных вредных и опасных факторов при проведении испытания на автоматизированном триботехническом комплексе, предназначенного для проведения испытания конструкционных материалов и смазочных сред на трение и изнашивание.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Рабочее время – время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с настоящим Кодексом, другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации относятся к рабочему времени.

Категория Ia относится к труду легкой тяжести. Согласно 92 статье Трудового Кодекса РФ продолжительность рабочего дня работников составляет 8 часов в день и 40 часов в неделю.

Сверхурочная работа – работа, выполняемая работником по инициативе работодателя за пределами установленной для работника продолжительности рабочего времени: ежедневной работы (смены), а при суммированном учете

рабочего времени - сверх нормального числа рабочих часов за учетный период  
99 статья Трудового Кодекса РФ предусматривает сверхурочную работу

Привлечение работодателем работника к сверхурочной работе допускается с его письменного согласия в следующих случаях:

1. при необходимости выполнить (закончить) начатую работу, которая вследствие непредвиденной задержки по техническим условиям производства не могла быть выполнена (закончена) в течение установленной для работника продолжительности рабочего времени, если невыполнение (не завершение) этой работы может повлечь за собой порчу или гибель имущества работодателя (в том числе имущества третьих лиц, находящегося у работодателя, если работодатель несет ответственность за сохранность этого имущества), государственного или муниципального имущества либо создать угрозу жизни и здоровью людей;
2. при производстве временных работ по ремонту и восстановлению механизмов или сооружений в тех случаях, когда их неисправность может стать причиной прекращения работы для значительного числа работников;
3. для продолжения работы при неявке сменяющего работника, если работа не допускает перерыва. В этих случаях работодатель обязан немедленно принять меры по замене сменщика другим работником.

Согласно статье 114 –115 ТК РФ работникам предоставляются ежегодные отпуска с сохранением места работы (должности) и среднего заработка. ежегодный основной оплачиваемый отпуск предоставляется работникам продолжительностью 28 календарных дней. Согласно 132 статье ТК РФ заработная плата каждого работника зависит от его квалификации, сложности выполняемой работы, количества и качества затраченного труда и максимальным размером не ограничивается, за исключением случаев, предусмотренных настоящим Кодексом.

## 5.1.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (ГОСТ 12.0.002-14 «ССБТ. Основные понятия. Термины и определения»), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические и психофизиологические (ГОСТ 12.0.003-2015 «ССБТ. Опасные и вредные факторы. Классификация»).

На инженера при проведении испытания на автоматизированном триботехническом стенде могут действовать опасные и вредные производственные факторы, которые приведены в таблице 31.

Таблица 31 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003 2015)	Этапы проведения испытаний		Нормативные документы
	Подготовка	Проведение испытаний	
1.Механические опасные факторы	+	+	Требования к микроклимату по ГОСТ 12.1.005-88 [2];  Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН
2.Термические опасные факторы	+	+	
3.Химические опасные факторы	+	+	

4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	2.2.4.548-96 [3]; Требования к уровню шума на рабочих местах СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [4]; Требования к освещению СП 52.13330.2016 [9]; Естественное и искусственное освещение СНиП 23-05- 95*[5]; Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля по ГОСТ 12.1.045-84 [6].
5. Микроклимат	+	+	
6. Недостаточная освещенность	+	+	
7. Психологические факторы	+	+	

## 5.2 Анализ факторов производственного процесса, которые может создать объект исследования.

### 5.2.1 Механические опасные факторы



Рисунок 42 - Механические опасные факторы

Основную опасность механического повреждения представляют вращающиеся части узлов триботехнического комплекса: узел скоростного нагружения; узел силового нагружения. Так же представляют опасность вентиляторы системы охлаждения.

Данный фактор может повлечь за собой тяжелые последствия: травмы конечностей, внутренних органов. Все вращающиеся части триботехнического комплекса необходимо закрывать кожухами, щитками, дверцами, экранами, барьерами.

Повреждению рукава высокого давления может привести к повреждениям кожных покровов, вследствие подачи жидкости под высоким давлением.

Для предотвращения разрыва необходимо использовать высокопрочные текстильные или пластиковые шланги, рукава высокого давления. Существенную травму может нанести оторванный фитинг, который может вылететь с большой скоростью. Для защиты необходимо использовать защитное ограждение, вокруг данного оборудования. Насосные станции необходимо ограждать заградительными щитами, для предотвращения риска получения травмы. Необходимо использовать шумоизолирующие щиты, для снижения уровня шума в рабочем помещении.

## 5.2.2 Термические опасные факторы



Рисунок 43 - Термические опасные факторы

Повышенная температура узлов триботехнического комплекса может привести к ожогам кожного покрова. Для предотвращения этого необходимо использовать защитные кожухи, экраны, которые будут закрывать нагретые узлы оборудования. Возможен вариант использования материалов с низкой теплопроводностью, при сохранении физико-механических свойств узлов и деталей триботехнического комплекса.

Попадание абразивной стружки и смазочной жидкости, может привести к термическому ожогу кожных покровов. Для предотвращения этого необходимо обеспечить герметичность испытательной камеры трения и системы очистки рабочей жидкости.

## 5.2.3 Химические факторы



Рисунок 44 - Химические опасные факторы

Применение масел в лабораторных испытаниях может вызвать раздражение кожных покровов при попадании на них, так как они содержат вредные химические элементы. При попадании на органы зрения может спровоцировать потерю зрения. Попадание масел в процессе эксперимента на кожный покров может привести к их ожогам, так как масла нагревается от пары трения до 120°C.

Частицы вредных металлов, содержащихся в маслах, в процессе эксперимента могут попасть вовнутрь организма, с следствие процесса испарения, в дальнейшем данный фактор может привести к химическому отравлению. К таким металлам можно отнести свинец, бериллий.

Смазывающие жидкости могут вызвать аллергические реакции при попадании их на кожный покров.

#### **5.2.4 Электрический ток и короткое замыкание**

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает на него сложное воздействие, являющееся совокупностью термического (нагрев тканей и биологических сред), электролитического (разложение крови и плазмы) и биологического (раздражение и возбуждение нервных волокон) воздействий.

Наиболее сложным является биологическое воздействие, свойственное только живым организмам. Любое из этих воздействий может привести к электрической травме, т. е. к повреждению организма, вызванному воздействием электрического тока или электрической дуги. Различают местные электротравмы и электрические удары. Приблизительно 55 % травм имеют смешанный характер. Основным источником является силовой шкаф триботехнического комплекса, цепи управления электрооборудованием комплексом (электродвигатели, частотные преобразователи, контролирующая аппаратура). Силовая часть электрооборудования состоит из напряжения 220 В переменного тока и 24В постоянного тока. Напряжение в цепи управления составляет 10В и 5В постоянного тока.

Требования, предъявляемые к электробезопасности Триботехнического комплекса, изложены в ГОСТ 27487–87 «Электрооборудование производственных машин».

Для предотвращения поражением электрическим током необходимо соблюдать следующие правила:

Все токоведущие и токоподводящие средства должны быть изолированы и защищены от соприкосновения с ними рабочего.

. Пользоваться неисправными кнопочными станциями, сломанными рукоятками переключателей и выключателей запрещается [].

Триботехнический комплекс и корпус двигателя должны быть заземлены. Заземляющие устройства должны соответствовать требованиям ПОТ Р О-95120-001-94. Заземляющий провод обычно подводится к зажимному болту сзади передней тумбы или основания станка []. Исправность провода следует проверять ежедневно перед началом работы.

При обнаружении неисправности его работу на станке прекратить и обратиться к дежурному электромонтеру.

При появлении искр на деталях стайка или ощущении тока при соприкосновении со станком необходимо прекратить работу и принять меры для исправления электропроводки электриком.

Не разливать охлаждающую жидкость около комплекса, так как сырой пол более опасен, если корпус комплекса окажется под напряжением.

Статическое электричество — явление, при котором на поверхности и в объёме диэлектриков, проводников и полупроводников возникает и накапливается свободный электрический заряд.

Конструкцией триботехнического комплекса должны быть исключены опасности от накапливания зарядов статического электричества в процессе проведения лабораторных испытаний, от протекания токонепроводящих рабочих жидкостей и др.

Испытательная камера должна быть снабжена заземляющими устройствами, снимающими электростатический заряд с пар трения. Анализ факторов производственного процесса, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

### 5.2.5 Микроклимат

Для организации комфортной трудовой деятельности человека необходимо обеспечить следующие показатели микроклимата в производственных помещениях, согласно СанПиН 2.2.4.548–96:



Рисунок 45 - Параметры микроклимата производственного помещения

Для обеспечения здорового и высокопроизводительного труда в производственном помещении должны быть установлены системы естественной вентиляции и кондиционер, система центрального отопления для поддержания постоянных температур, скоростей и относительной влажности воздуха.

## 5.2.6 Освещенность рабочей зоны

Уровень освещенности оказывает влияние на психические функции и физиологические процессы в организме человека. Хорошее освещение действует тонизирующе, стимулирует активность, предупреждает развитие утомления, повышает работоспособность.

Освещенность рабочего места нормируется согласно СНиП 23-05-95. В помещении присутствует два типа освещения – искусственное (лампа освещения) и естественное (солнечный свет). Естественное освещение достигается путем установки в помещении окон с коэффициентом естественного освещения КЕО не ниже 4%.

Характеристика зрительной работы - средней точности; наименьший размер объекта 0,5 ... 1мм; разряд зрительной работы – IV; подразряд – а; контрастность с фоном – малый; фон – темный; освещенность искусственного освещения – 750 Лк., коэффициент пульсации  $K_{п} = 20\%$ , коэффициент естественной освещенности при боковом естественном освещении  $КЕО = 1,5\%$ , при комбинированном совмещенном освещении  $КЕО = 0,9\%$ .

Размещение светильников определяется размерами помещения:

Длина (В) – 6 м;

Ширина (А) – 5,5 м;

Высота (Н) – 3,5 м;

Уровень рабочей плоскости (d) – 1 м;

Свес светильников (m) – 0,5 м;

Коэффициент отражения потолка (a) – 50 %; стен (b) – 30 %; пола (c) – 10 % - для производственных помещений с незначительным пылевыведением;

Коэффициент запаса  $k = 1,5$ ;

Коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ ;

Расстояние между светильниками ( $h = H - d - m$ ) – 2 м;

Площадь помещения –  $S = 33 \text{ м}^2$ ;

Выбираем светильники типа ОД,  $\lambda = 1,4$ .

Приняв  $h_c = 0,5$  м, определяем расчетную высоту:

$$h = H - h_c - h_{\text{рп}} = 3,5 - 0,5 - 1 = 2 \text{ м};$$

Расстояние между светильниками:

$$L = 1,4 \cdot 2 = 2,8 \text{ м};$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$\frac{L}{3} = \frac{2,8}{3} = 0,933 \text{ м} \approx 1 \text{ м}$$

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{(A + B) \cdot h} = \frac{33}{(6 + 5,5) \cdot 2} = 1,44$$

По индексу помещения и коэффициентам отражения находится коэффициент использования светового потока, для данного случая равный  $\eta = 0,5$ . Количество светильников, применяемых в аудитории –  $N = 10$ . Коэффициент минимальной освещенности был принят  $z=1,1$ . Нормируемая освещенность согласно СП 52.13330.2011 примерно равна  $E_n = 400$  лк, коэффициент запаса  $k_3 = 1,6$ .

Для необходимого освещения световой поток равен:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{N \cdot \eta} = \frac{400 \cdot 33 \cdot 1,6 \cdot 1,1}{10 \cdot 0,5} = 4646,4 \text{ лм}$$

Световой поток для одного светильника равен:

$$\Phi_{\text{л1}} = \frac{\Phi_{\text{л}}}{N} = 464,6 \text{ лм}$$

Исходя из расчетов, была подобрана люминесцентная лампа типа OSRAM DULUX S 9W/840 G23 со значением светового потока, равного 600 лм.

Допустимые нормы согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» лабораторное помещение относится к категории Ia. К категории Ia относятся работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением до 120 ккал/ч (до 139 Вт).

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 в таблице 29 приведены оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений, в таблице 30 приведены допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [].

Таблица 32 - Оптимальные показатели микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, кВт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139Вт)	22–24	21–25	60–40	0,1
Теплый	Ia (до 139Вт)	23–25	22–26	60–40	0,1

Таблица 33 - Допустимые показатели микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, кВт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
		Ниже оптимальной величины	Выше оптимальной величины			
Холодный	Ia (до 139Вт)	20–21,9	24,1–25	19–26	15–75	0,1
Теплый	Ia (до 139Вт)	21–22,9	25,1–28	20–29	15–75	0,2

Нормирование предельно допустимой концентрации вредных веществ в воздухе осуществляется согласно Гн 2.2.5.1313-03 [27]. ПДК серы составляет

6 мг/м<sup>3</sup>; свинца 0,05 мг/м<sup>3</sup>; хлордифенила 5 мг/м<sup>3</sup>, молибдена 3 мг/м<sup>3</sup>. Источником свинца и бериллия являются обрабатываемые материалы, молибден и дифенил входят в состав масел.

### 5.2.7 Психологические факторы

К психологическим вредным факторам можно отнести монотонность рабочего процесса.

В большинстве случаев работа на металлорежущем оборудовании монотонна, многократное повторение одних и тех же действий. Данный фактор может привести к переутомлению организма, спровоцировать потерю концентрации, повышению риска совершить ошибку, что может привести к производственным травмам.

### Средства защиты

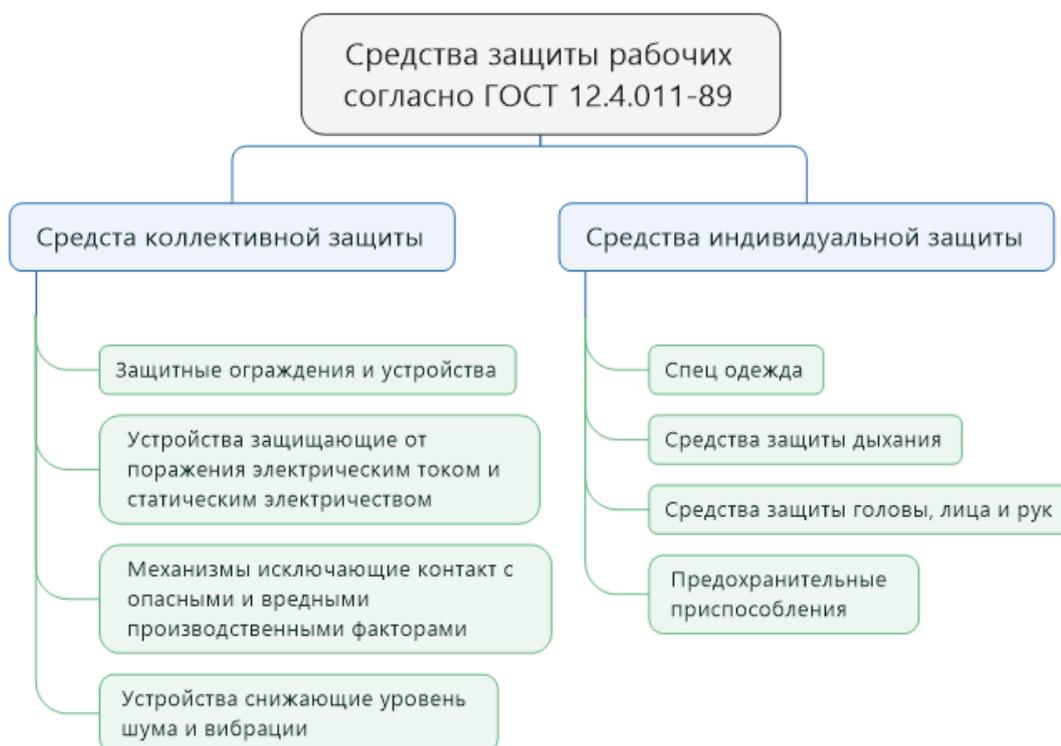


Рисунок 46 - Средства защиты рабочих

При работе на автоматизированном триботехническом комплексе запрещено работать в перчатках, так как имеется риск защемления их в вращающихся и подвижных узлах машины что может привести к механическим повреждениям.

Разрешается использовать перчатки при наладке оборудования (установка/ демонтаж пар трения) при условии полного обесточивания приводов.

Для защиты органов зрения необходимо использовать защитные очки.

### **5.3 Экологическая безопасность**

К основному загрязняющему фактору, возникающем в процессе проведения лабораторных испытаний, можно отнести масла, применяемые для смазки пар трения. В состав масел могут входить токсичные вещества как: сера, хлор, тяжелые металлы (барий, сурьма, цинк, свинец).

#### **5.3.1 Влияние смазывающих жидкостей на атмосферу**

При испарении смазывающей жидкости в процессе трения (масляный туман) или хранения выделяются синтетические масла с повышенным содержанием полихлора-дифениламина (ПХД). Данное химическое соединение, попадая в атмосферу, образует еще более токсичные соединения - полихлордибензодиоксины и полихлордибензофураны. Помимо ПХД при испарении в атмосферу попадает сера, пары тяжелых металлов, которые распространяются по воздуху, вступая в химические реакции с другими элементами, тем самым создают угрозу для живых организмов.

#### **5.3.2 Влияние смазывающих жидкостей на гидросферу**

Отработанную смазочную жидкость в большинстве случаев утилизируют в землю. При разложении смазочных жидкостей или нарушении контейнера жидкость попадает в поверхностные грунтовые воды. В почве образуются так называемые масляные линзы, из которых масло со скоростью 10,2-10,5 м/с распространяется в ширину и вглубь, контактирует с грунтовыми водами и мигрирует с ними. Через грунтовые воды, элементы СОЖ могут попадать в организм человека, привести к заражению растений.

Для снижения уровня загрязнения атмосферы, гидросферы применяют экологические чистые смазочные жидкости, либо разрабатываются технологические процессы, требования связанных с утилизацией отработанных смазочных жидкостей.

### **5.3.3 Влияние частиц абразивного износа на литосферу**

К фактору загрязняющего литосферу можно отнести стружку (продуктов износа) пар трения. При утилизации стружки в землю, возникают химические реакции между металлами и другими химическими элементами, находящимися в природе.

Для снижения влияния данного фактора на литосферу необходимо металлическую стружку собирать в контейнер с последующей переплавкой в сталеплавильных печах.

### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.**

В данной главе рассмотрим чрезвычайную ситуацию (пожар), возникшую в лаборатории.

Пожаровзрывобезопасность – это состояние объекта экономики и его технологических процессов, при котором с установленной вероятностью исключается возможность пожара и взрыва и воздействие на людей их опасных факторов, а также осуществляется защита материальных ценностей (по ГОСТ 12.1.010-76 и ГОСТ 12.1.031-81). Она обеспечивается комплексом организационных, противопожарных, инженерно-технических и специальных мероприятий и средств как при эксплуатации объектов, так и в случаях их реконструкции, ремонта или аварийной (чрезвычайной) ситуации.

Причинами возникновения пожара на производственном участке могут быть:

1. Неисправность электропроводки помещения.
2. Короткое замыкание в силовом шкафу Триботехнического комплекса.
3. Возгорание триботехнического комплекса вследствие перегрева его уз лов.
4. Неисправность цепей управления.

5. Неисправность элементов управления станком.
6. Попадание горячей стружки, искр на легко воспламеняющиеся объекты.
7. Взрыв легковоспламеняющейся пыли.

#### **5.4.1 Профилактические мероприятия**

Пожарная профилактика – это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также создание условий успешного тушения пожара.

Для предотвращения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие меры:

1. В рабочей зоне должны отсутствовать легковоспламеняющиеся вещества.
2. Все токоведущие цепи должны быть в защитной оболочке.
3. Использование предохранительных устройств (пускатели с тепловым реле).
4. Не допускать перегрев элементов испытательного стенда.
5. Рабочая область должна быть оборудована датчиками дыма.
6. Необходимо наличие пожарной сигнализации.
7. Наличие средств пожаротушения.
8. Инструктаж по пожарной безопасности.

Требования по пожарной безопасности изложены в СНиП 21-01-97.

При тушении горящего электрооборудования под напряжением возникает риск поражения электрическим током.

Для тушения необходимо использовать:

1. углекислоту и огнетушащий порошок из ручных огнетушителей (ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 и ОП-8, ОПЗ-2 соответственно);

2. воздушно-механическую пену на пресной воде из огнетушителей ОВПМ-8, ОВПМ-30у и стационарных огнетушителей типа СО;
3. пресную воду соленостью не более 10 Бр;
4. стационарную систему и переносные средства объемного химического тушения.

#### **5.4.2 Требования пожарной безопасности к путям эвакуации**

1. Все двери эвакуационных выходов должны свободно открываться в сторону выхода из помещений. При пребывании в помещении людей, двери могут запираются только на внутренние, легко открываемые запоры.
2. Пути эвакуации должны быть освещены в соответствии с требованиями СНиП 23-05-95.
3. На путях эвакуации **ЗАПРЕЩАЕТСЯ**:
  1. Загромождать эвакуационные пути и выходы (в том числе проходы, коридоры, тамбуры, лестничные площадки, марши лестниц, двери, эвакуационные люки) различными материалами, изделиями, оборудованием и другими предметами.
  2. Устраивать в тамбурах выходов сушилки одежды любой конструкции, вешалки для одежды и гардеробы, хранение (в том числе временное) любого инвентаря и материалов.
  3. Устраивать на путях эвакуации пороги, турникеты, раздвижные, подъёмные и вращающиеся двери и другие устройства, препятствующие свободной эвакуации людей.
  4. Фиксировать самозакрывающиеся двери лестничных клеток, коридоров, холлов и тамбуров в открытом положении (если для этих целей не используются автоматические устройства, срабатывающие при пожаре), а также снимать их.

5. Применять горючие материалы для отделки, облицовки и окраски стен и потолков, а также ступеней и лестничных площадок на путях эвакуации.

Согласно НПБ 105 – 95 помещение по пожаробезопасности относится к категории В2. Данная категория подразумевает, что помещение пожароопасное, наличие горючих и трудногорючих жидкостей, твёрдых горючих и трудногорючих веществ и материалов (в том числе пыли и волокна), способных при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом гореть, не формируя взрыва.

## **5.5 Последовательность действий при возникновении пожара**

### **5.5.1 Действия сотрудника лаборатории (инженера)**

Каждый работник цеха при обнаружении пожара или признаков горения (задымления, запаха гари, повышения температуры и т.п.) обязан:

1. немедленно поставить в известность своего непосредственного руководителя (ответственного за противопожарное состояние), другое должностное лицо, заменяющее его, а при его отсутствии лично сообщить по телефону "01" в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);
2. принять по возможности меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей.
3. В условиях задымления и наличия огня в помещении передвигайтесь вдоль стен, согнувшись или ползком, для облегчения дыхания прикройте нос и рот платком (тканью), смоченной водой.
4. Через пламя необходимо передвигаться, накрывшись с головой верхней одеждой, по возможности облить водой, загоревшую

одежду сорвать или погасить пламя, а при охвате огнем большой части одежды плотно закатать работника в ткань (одеяло, кошму).

На рисунке 47 показан план эвакуации из здания.



Рисунок 47 - План эвакуации

## **Выводы**

Чрезвычайно важно, чтобы инженер разработал системный взгляд на мир, чтобы признать, что он является агентом социальных преобразований. Таким образом, недостаточно знать эмпирические, технические и научные знания, нужно также знать, как применять эти знания этическим и человеческим образом, поэтому во всех проектах важно выработать социальную ответственность разрабатываемого проекта. Поэтому были рассмотрены важные вопросы, связанные с организационными законами, безопасностью труда, планировкой рабочей зоны. Проанализировав эти факторы по отношению к рабочему месту, мы можем сделать вывод требования к микроклимату в помещении и уровню шума на рабочем месте соблюдены; была предложена установка кондиционирования воздуха, поэтому окна и двери не нужно открывать летом, так как это значительно увеличивает количество внешнего шума в помещении, вызывая дискомфорт у работника. Требования по уровню освещения соблюдены

В подразделе экологическая безопасность рассмотрен воздействия смазочно-охлаждающих жидкостей на окружающую среду. Были предложены конкретные способы снижения воздействия опасных факторов на окружающую среду.

В подразделе безопасность в чрезвычайных ситуациях приведены возможные ЧС на рабочем месте, а также методы их предотвращения. Было установлено, что основной возможной причиной ЧС является возникновение пожара, были представлены методы его предотвращения, а также план эвакуации здания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы было сделано следующее:

1. Проведен аналитический обзор и сравнение программных пакетов конечно-элементного анализа. После анализа достоинств и недостатков был выбран пакет ANSYS.
2. Разработана геометрическая и конечно-элементная модель пары трения «вал-колодки».
3. Построена математическая модель пары трения.
4. Проведено теоретическое исследование изнашивания пары трения «вал-колодки» в программном пакете ANSYS при динамическом режиме нагружения полученные результаты соответствуют практическим результатам. Однако в дальнейшем для более подробного моделирования необходимо построить более точную модель описывающую динамику работы трибосопряжения.
5. При дальнейшем исследовании необходимо построить свою модель износа, учитывающую влияния все физических факторов, действующих на пару трения «вал-колодки» в процессе ее испытаний.
6. Проведен анализ влияния износа на динамические показатели (такие как контактное давление, контактная площадь) а также напряженное состояния пары трения «вал-колодки».
7. Определена экономическая и ресурсоэффективная составляющая проекта. Проведен расчет затрат НИИ. Проведен SWOT и FAST анализ исследовательского проекта.
8. Рассмотрен вопрос с организацией рабочего места исследователя, осуществляющего испытания в лаборатории. Определены вредные и опасные факторы, оказывающие влияние на исследователя при проведении испытаний.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатенков, И.А. Износоконтактная задача с приложениями к инженерному расчету износа / И.А. Солдатенков, М. – Москва: ФИЗМАТКНИГА, 2014. – 160 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с., ил. 280.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) Учебник. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: "Издательство МСХА", 2002. 632 с, ил. 250.
4. Archard J. F. Theory of mechanical wear // Research. 1952. V. 5. No 8. P. 395–396
5. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе.
6. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978 – Кн.1. 1978. 400 с
7. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Theory Reference Guide, Inc. – 2020.
8. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Contact Technology Guide, Inc. – 2020.
9. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Mechanical User Guide, Inc. – 2020.
10. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Meshing User Guide, Inc. – 2020.
11. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Technology Showcase Example Problems, Inc. – 2020.
12. Abaqus 6.14 Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wufengyun.com:888/>. – Дата доступа: 25.05.2021.

13. COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>. – Дата доступа: 25.05.2021.
14. Рыжков, С.А. Проектирование шин с использованием программного комплекса ABAQUS / С.А. Рыжков, К.А. Ильин, А.Н. Варюхин. – Москва: 2006. – 5 с.
15. Elabbasi, N. H. Simulating Wear in Disc Brakes / N. H. Elabbasi, M. J. Hancock, S. B. Brown. – Needham, MA, USA: Veryst Engineering, 2014. – 3 с.
16. Saad M.S., M.S. Computer Simulation/Prediction of Wear in Mechanical Components / M.S. Saad M.S., M. S. Mukras, S. B. Brown. – Buraydah : Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Qassim University, 2020. – 15 с.
17. Zhang, S. Simulation Study on Friction and Wear Law of Brake Pad in High-Power Disc Brake / S. Zhang, Q. Hao, Y. Liu. – Dalian116028, China: School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, 2019. – 16 с.
18. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / Предисл. А.С. Шадского. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 272 с/
19. Зуев В.С. Преимущества и недостатки специализированных программных пакетов в образовательной деятельности // Бюллетень науки и практики - Bulletin of Science and Practice научный журнал (scientific journal). - 2018/

**Приложение А**  
(справочное)

Literature review

Modeling the wear of a dynamically loaded friction pair during rotary motion  
of the executive body

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ-91	Шеповалов Игорь Максимович		

Консультант школы отделения (НОЦ) \_\_\_\_\_ (ШБИП ОИЯ) \_\_\_\_\_ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Миронова Вероника Евгеньевна	к.ф.н.		

# 1 Literature review

## 1.1 Factors affecting wear

Wear is a change in the size, shape, weight or condition of the surface of a product, tool due to the destruction (wear) of the surface layer of the product during friction [1, 2].

As a result of wear, the performance of the tribo interface decreases, losses increase, noise and vibrations appear during the operation of machines and mechanisms.

The nature of wear is significantly influenced by various external factors [1]: structure and hardness of the material, lubricant, abrasive, environment, temperature, nature and direction of sliding. Examples of this influence are given below.

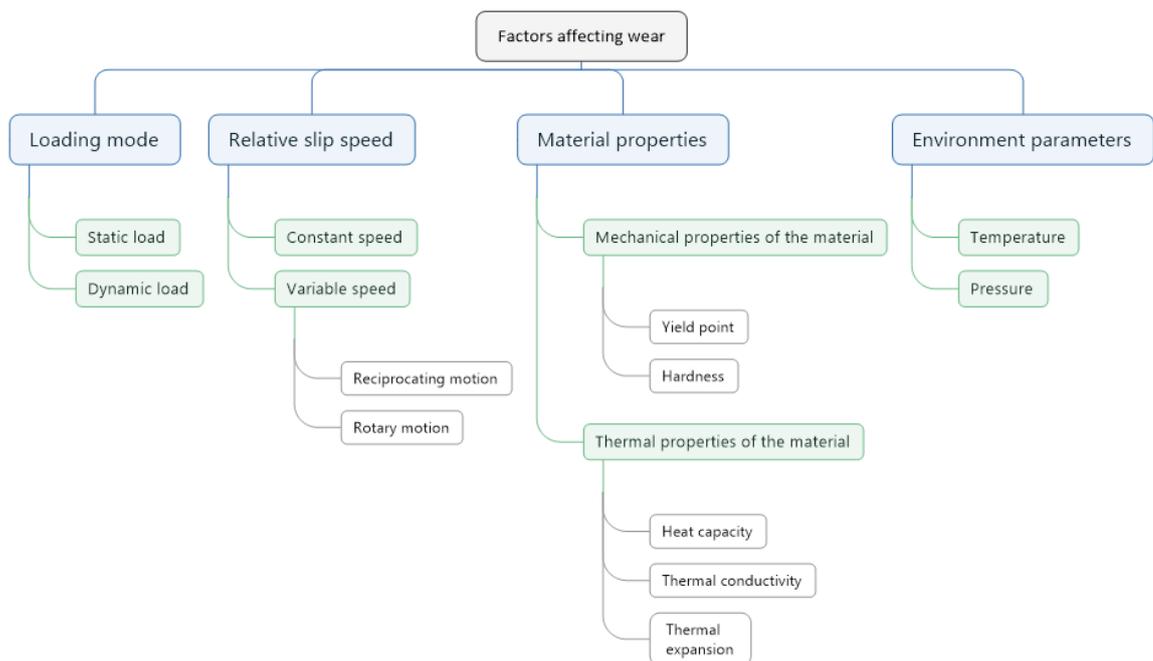


Figure 1 - Factors affecting wear

## 1.2 Laws of wear

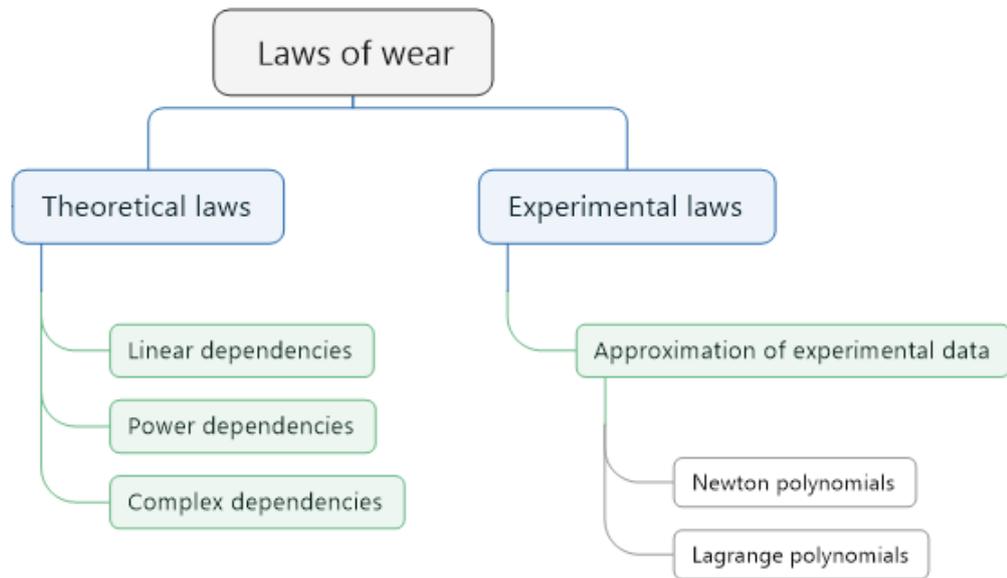


Figure 2 - Laws of wear

Examples of linear wear laws can be:

Wear law based on the theory of abrasive wear by M.M. Khrushch and M.A. Babichev [1, p. 11] in 1941, according to which the material surfaces are worn out by a large number of microroughnesses in the form of rigid pyramids of different heights:

$$I = c_1 \cdot \frac{P}{H} \quad (1)$$

Where:

$c_1$  - a certain coefficient is, according to Holm's theory (1946), the probability of separation of an atom upon its collision with another atom ( $c_1 \cong 10^{-5}$ ),

$P$  - contact pressure,

$H$  - material hardness,

Some models of wear can lead to a linear wear law, assuming elastic contact of microroughnesses. A. Schallamakh [1, p. 12] in 1954 received the following formula:

$$I = c_2 \cdot P/E, \quad (2)$$

where:  $E$  - modulus of elasticity of the material,

$c_2$  - coefficient proportional to the radius of curvature of microroughnesses

Theories based on the energy concept of wear also lead to linear dependences of wear on contact pressure.

Linear wear laws also include the Archard [1, p. 12] wear model, which is a linear dependence of the wear rate on the contact pressure and the relative slip rate. In the future, we will consider this model in more detail.

An example of power law of wear can be:

The dependence obtained by G.D. Polosatkin [1, p. 12] in 1946, a power-law dependence of wear on contact pressure:

$$I = c \cdot (\mu \cdot P)^\gamma, \quad (3)$$

where:  $\mu$  - coefficient of friction,

$c$  и  $\gamma$  - model parameters

An example of a complex dependency for wear would be:

Dependence built by Uhlig [1, p. 15] (1954) which is based on the theory of metal wear during fretting corrosion:

$$W = (c_1 \cdot \sqrt{P} - c_2 \cdot P) + c_3 \cdot P, \quad (4)$$

where:  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  - positive coefficients depending on the flow pressure of the material and the parameters of the process of its oxidation.

$P$  - contact pressure

## Archard model

In the 1950s. British engineer John F. Archard has developed an empirical model describing the rate of abrasive wear of friction surfaces [4].

Archard's model makes it possible to assess the degree of wear on hard surfaces of parts due to the impact of abrasive particles.

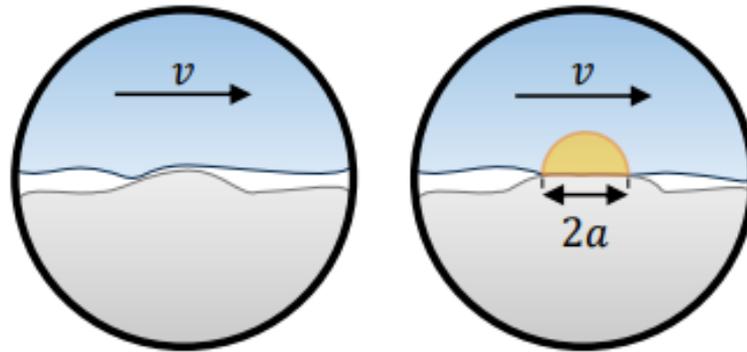


Figure 2 - Wear occurs when a piece of material separates from the roughness during contact. The shape is approximated as a hemisphere with a radius of  $a$ .

Considering the adhesive type of wear, the model assumes that the sliding of the sphere in contact plastically deforms the roughness, in which the yield point is equal to the hardness. Average contact normal load is written as:

$$dW = H \cdot \pi \cdot a^2, \quad (5)$$

where:  $a$  is the radius of the contact zone. It is assumed that the hemisphere has the shape of a particle (Fig. 2) with a volume  $2 \cdot \pi \cdot a^3 / 3$  which is released after sliding at a distance of  $2 \cdot a$  with a probability  $P$ . The volume of wear at the sliding distance is then:

$$\frac{dV}{ds} = \frac{P \cdot 2 \cdot \pi \cdot a^3}{6 \cdot a} = \frac{P \cdot \pi \cdot a^2}{3} = \frac{P \cdot dW}{3 \cdot H}, \quad (6)$$

By integrating with respect to the sliding distance, the total wear volume,  $V$ , can be expressed as a function of load, sliding distance and hardness:

$$V = \frac{K \cdot W \cdot s}{H}, \quad (7)$$

where:  $K$  - constant wear rate

$W$ - general normal load,

$s$ - surface friction path

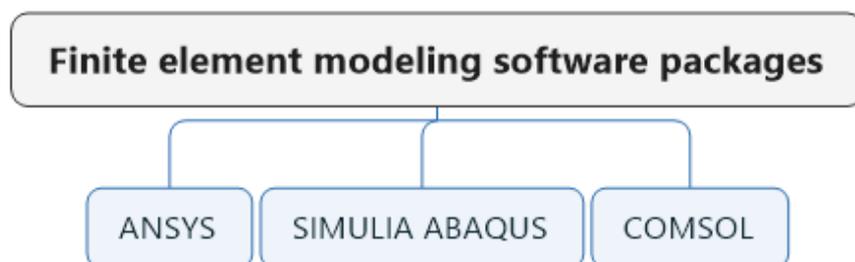
$H$ - the hardness of the material subject to wear.

$K$  is a dimensionless wear factor usually derived experimentally to characterize material wear Archard's model is a probabilistic model.

The Archard model is not intended for modeling processes with high speeds, typical, for example, for metal cutting (milling, turning, etc.). Archard's model does not consider the effects of temperature.

### 1.3 Overview of Wear Modeling Software

The finite element method is currently used to simulate the wear process of friction pairs. The main idea of modeling the wear of the contact surface is to approximate the wear by a function (law) where the variables are the characteristics of the friction pair, such as sliding speed, contact pressure, temperature, etc. In the process of modeling, the nodes of the contact surface are displaced into the depth of the model, which simulates the process of material removal. Contact surface wear modeling is implemented in various modern engineering analysis software packages. Let us review some of them:



## Figure 3 - Software packages for finite element modeling

### 1.3.1 ANSYS

ANSYS is a universal finite element analysis software package aimed at solving problems in various fields of engineering (dynamics and strength of structures, heat transfer, fluid and gas mechanics, electromagnetism), as well as related interdisciplinary problems (thermal strength, magnetoelasticity, etc.). The main solution of structural mechanics problems is ANSYS Mechanical APDL [9].

For solving problems of fluid mechanics and gas in ANSYS there are two main solvers - Fluent and CFX. Each solver has its own wrapper.

The main idea of the ANSYS software package is to combine various solvers and applications in a single computing environment. In modern ANSYS, many solvers are integrated with various sets of mathematical models of physical processes and numerical methods. The main platform for exchanging data between components and applications is ANSYS Workbench.

The Workbench platform allows you to present the calculation project in the form of a structure that clearly shows the sequence of the calculation performed. The structural representation of the calculation also allows you to systematize and store the results obtained.

You can see modules and applications used in ANSYS Workbench to prepare and conduct numerical analysis:

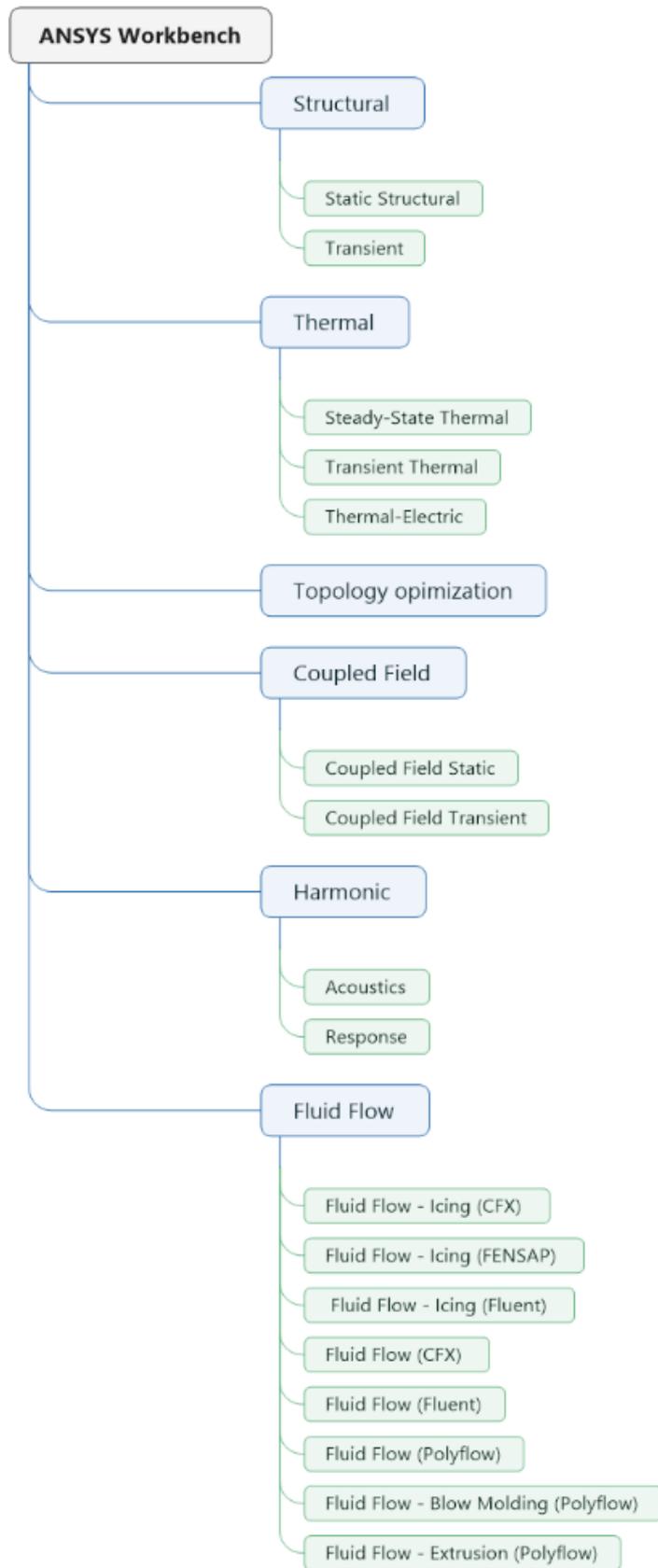


Figure 4 - ANSYS Workbench modules

Static Structural is a system for detecting displacements, stresses and strains in structures or components caused by loads that do not cause significant inertial and damping effects. Stable loading and response conditions are assumed. Structural loads and response are assumed to vary slowly over time.

Transient Structural is a system for analyzing the dynamic response of a structure to any general time-dependent loading. This system allows the determination of time-varying displacements, stresses, deformations and forces in a structure and its components when it is subjected to various transient loads. Temporal and inertial effects are considered to be important.

Steady-State Thermal - a stationary thermal system that detects temperatures, temperature gradients, heat flow rates and heat flows in an object caused by thermal loads that do not change over time. Stationary thermal analysis calculates the effect of stationary heat loads on a system or a component. Stationary thermal analysis is performed before transient thermal analysis to determine the initial conditions and stationary thermal analysis can be the last step of transient thermal analysis performed after all transient effects have decreased.

A transient thermal analysis system detects temperature and other thermal quantities that change over time. It is applied in many areas of heat transfer (eg heat treatment problems, electronic packaging design, nozzles, engine blocks, pressure vessels, etc.).

Thermal electrical system allows you to simultaneously solve thermal and electric fields. This ability to simulate a coupled field allows one to simulate Joule heating for resistive materials, as well as the Seebeck, Peltier and Thomson effects for thermoelectricity.

A topology optimization system calculates the optimal structural design of the geometry for a selected area of the model with specified design goals and constraints.

The coupled field static system detects movements, stresses, strains and forces caused by loads that do not cause significant inertial and damping effects. Stable loading and response conditions are assumed. It is assumed that loads and responses vary slowly over time. The system supports 2D coupled and structural thermal physics.

The coupled field transient determines the time-varying displacements, deformations, stresses, and forces that respond to any transient load. The system allows you to analyze 2D conjugate and structural thermal physics.

Eigenvalue Buckling is a system for solving the problem of eigenvalue stability of structures. This method is consistent with the training approach of sustainability analysis; for example, studying the stability of the classical Euler problem. With the help of this system, an analysis of the buckling of a structure is carried out both in a linear and non-linear formulation.

An electrical system maintains stationary electrical conductivity. This analysis is used to determine the electrical potential in a conductive body created by an externally applied voltage or current. From the solution obtained, other results are calculated, such as conduction currents, electric fields and Joule heating.

An explicit dynamics system can perform various engineering simulations, such as modeling the nonlinear dynamic behavior of solids, liquids, gases and their interactions.

Fluid Flow - Icing (CFX) - system is designed to perform complete icing analysis. It contains cells for connecting to the ANSYS CFX component system and triggering airflow with the CFX solver, setting and triggering droplets with the DROP3D solver, setting and triggering icing with the ICE3D solver, mesh displacement due to ice accretion, and visualizing the results in CFD- Post or Viewmerical.

Fluid Flow - Icing (FENSAP) performs a complete icing analysis. It contains cells for setting and triggering airflow with the FENSAP solver, setting and triggering drops with the DROP3D solver, setting and triggering icing with the ICE3D solver, grid displacement due to ice accretion, and rendering the results in CFDPost or Viewmerical.

Fluid Flow - Icing (Fluent) - The Fluid Flow - Icing (Fluent) system performs a complete icing analysis. It contains cells for connecting to the ANSYS Fluent component system and triggering airflow with the Fluent solver, setting and triggering droplets with the DROP3D solver, setting and triggering icing with the ICE3D solver, mesh displacement due to ice accretion, and visualizing the results in CFD- Post or Viewmerical.

The Fluid Flow (CFX) system performs the analysis of incompressible and compressible fluid flow and heat transfer in complex geometries.

The Fluid Flow (Fluent) system performs the analysis of incompressible and compressible fluid flow and heat transfer in complex geometries.

Fluid flow systems (Polyflow) analyze fluid flows with free surfaces, complex rheology (including non-Newtonian behavior with viscoelasticity), heat transfer, and chemical reactions.

Three Polyflow fluid flow analysis systems are available in the Workbench:

Fluid Flow System (Polyflow) provides full Polyflow simulation capabilities.

The Fluid Flow - Blow Molding (Polyflow) system provides only those Polyflow applications that are suitable for blow molding simulation.

The Fluid Flow - Extrusion (Polyflow) system provides only those Polyflow applications that are suitable for extrusion simulation.

Harmonic Acoustics determines the steady-state response of the structure and the surrounding fluid to loads and excitations that change sinusoidally (harmonically) over time.

The harmonic response system determines the steady-state response of a linear structure to loads and excitations that vary sinusoidally (harmonically) with time.

The hydrodynamic diffraction system calculates the wave forces and movements of a structure in regular or irregular waves.

### **Wear in ANSYS**

Since 2015, ANSYS Mechanical has been able to simulate material wear [8].

Wear is the gradual loss of material from the surface of a solid upon contact with another solid. The wear of the surfaces of the contacting bodies is a process that depends on many factors, but it can be approximated by models that determine the loss of material depending on various parameters in the contact pair.

In Mechanical APDL, a module has been added to simulate material loss due to wear, which is approximated by the equation according to which the contact nodes move inside the model. The following models are available for determining wear in ANSYS:

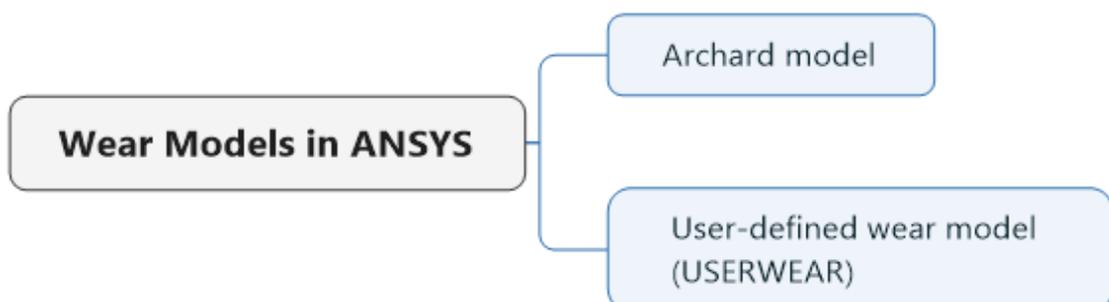


Figure 5 - Wear models in ANSYS

As the contact nodes move to new positions, the contact variables (such as contact pressure) change, thus simulating the effects of wear.

### **Archard model in ANSYS**

The Archard wear model is a popular sliding wear model with fairly good wear modeling results. The original model proposed by Archard assumed that the rate of volume loss due to wear is linearly proportional to the contact pressure and sliding rate at the contact surface. The ANSYS program implements a generalized version of this model, which admits the correct dependence of the law on contact pressure and velocity [7, p. 555].

It is assumed that wear occurs in the internal normal direction of the surface, taken as the direction opposite to the normal direction of contact. The wear rate in the contact node,  $\dot{w}$ , is given by:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} \cdot p^m \cdot v_{rel}^n, \quad (8)$$

where:  $K$  - wear factor

$H$  - material hardness

$p$  – contact pressure

$v_{rel}$  - relative sliding speed

$m$  - pressure indicator

$n$ - speed indicator

In the above equation,  $K, H, m$  and  $n$  are user-defined based on experimental research.

Wear can be calculated:

1. Using contact pressures.
2. Using nodal stresses in the wear calculation.

If nodal stresses are used in the calculation, the stress calculated at the Gaussian point of the solid element is first copied to its nearest node. A contact element superimposed on a rigid element to which the Gaussian point belongs uses

this stress  $\sigma$  and the contact normal  $n$  to calculate the thrust vector component in the direction of the contact normal: this normal thrust vector component is used instead of the contact pressure in the wear rate equation.

For simulations, averaging of wear over the contact area of the contact pair can be used so that the total volume lost due to wear coincides with the total volume lost due to wear when each node wears at a different rate. Average wear increase is calculated as:

$$\dot{w}_{av} = \frac{\sum \dot{w} \cdot A}{\sum A}, \quad (9)$$

where  $A$  represents the contact area at a point, and the summation occurs over all contact points in the contact pair.

### **ANSYS Wear Modeling Assumptions and Limitations**

When modeling wear in ANSYS, the following guidelines and limitations are applied:

1. Wear is only active for quasi-static and transient dynamic analysis. If linear disturbance analysis follows static or transient dynamic baseline analysis that includes wear, the wear effect calculated at the end of the restart point is also included in the linear disturbance analysis.
2. Wear parameters must be determined prior to running for calculation. Wear rates may change over time. In the case of a nonlinear mesh rebuild, the wear data determined in the first load step will be used, regardless of which load step is used as the restart point. This is due to the multi-frame restart architecture, whereby the restart database is based on the start of the solution.
3. Use wear only with the following contact algorithms: Augmented Lagrangian or Penalty function. Using wear with a pure Lagrangian

contact algorithm can lead to convergence problems and is not recommended.

4. Wear is only available when the contact detection point is an anchor point.
5. Wear is only available for the following types of contact surfaces: standard and rough.
6. When modeling wear, it is recommended that the underlying members (below the contact members) should be structural rigid members or structural rigid members with associated fields.
7. Wear is not available for layered solids.
8. In general, you should use an asymmetric contact to simulate wear on only one side of the contact interface. However, you can use a balanced contact if wear is required on both sides of the interface.
9. During a zoning change, as the geometry is updated with accumulated wear, wear is set to zero (similar to offset) on subsequent restart. The same is true for the adaptability of a nonlinear mesh; the geometry is updated with the accumulated wear and wear is set to zero whenever the nonlinear mesh is adaptive.

### **1.3.2 SIMULIA ABAQUS**

ABAQUS is a software package in the field of finite element strength analysis, with the help of which it is possible to carry out accurate calculations of structures in a linear and non-linear formulation [12].

Since 2005 Abaqus, Inc. has been a part of Dassault Systems company. In the future, it is planned to create a new simulation environment SIMULIA, which will contain solutions from Dassault Systemes and Abaqus, Inc. in the field of strength

calculations, as well as combine the best solutions of third parties to create powerful design tools and multidisciplinary structural analysis.

ABAQUS consists of the following main modules:

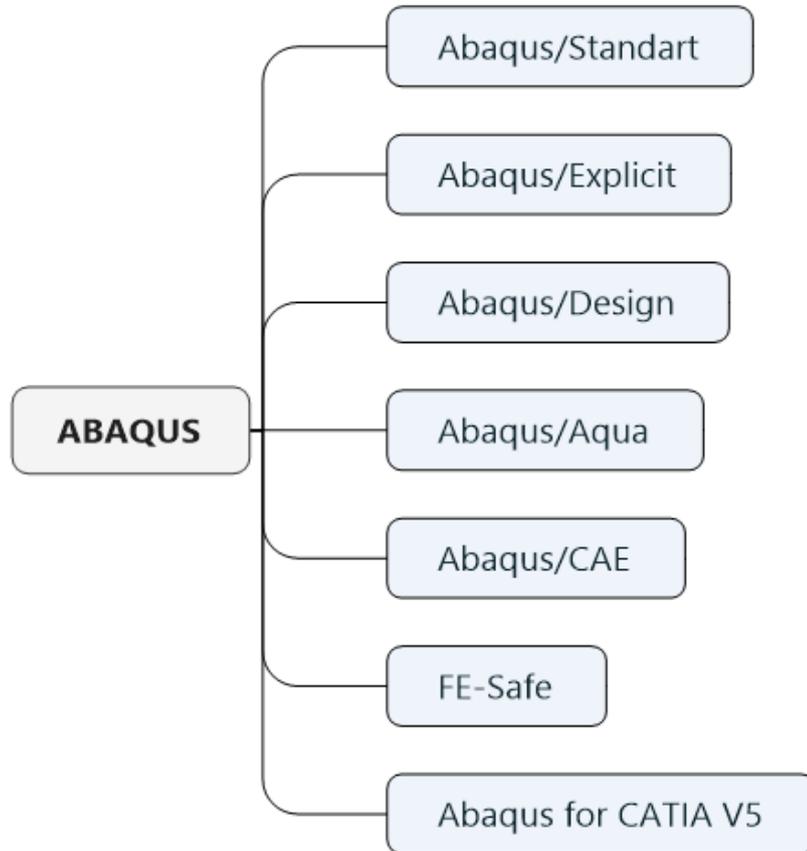


Figure 6 - ABAQUS modules

Abaqus / Standart - the module is designed to solve problems of statics, dynamics, heat transfer in conjunction with contact interactions and nonlinear properties of materials, based on an implicit integration scheme.

Abaqus / Standart allows you to solve the following types of tasks:

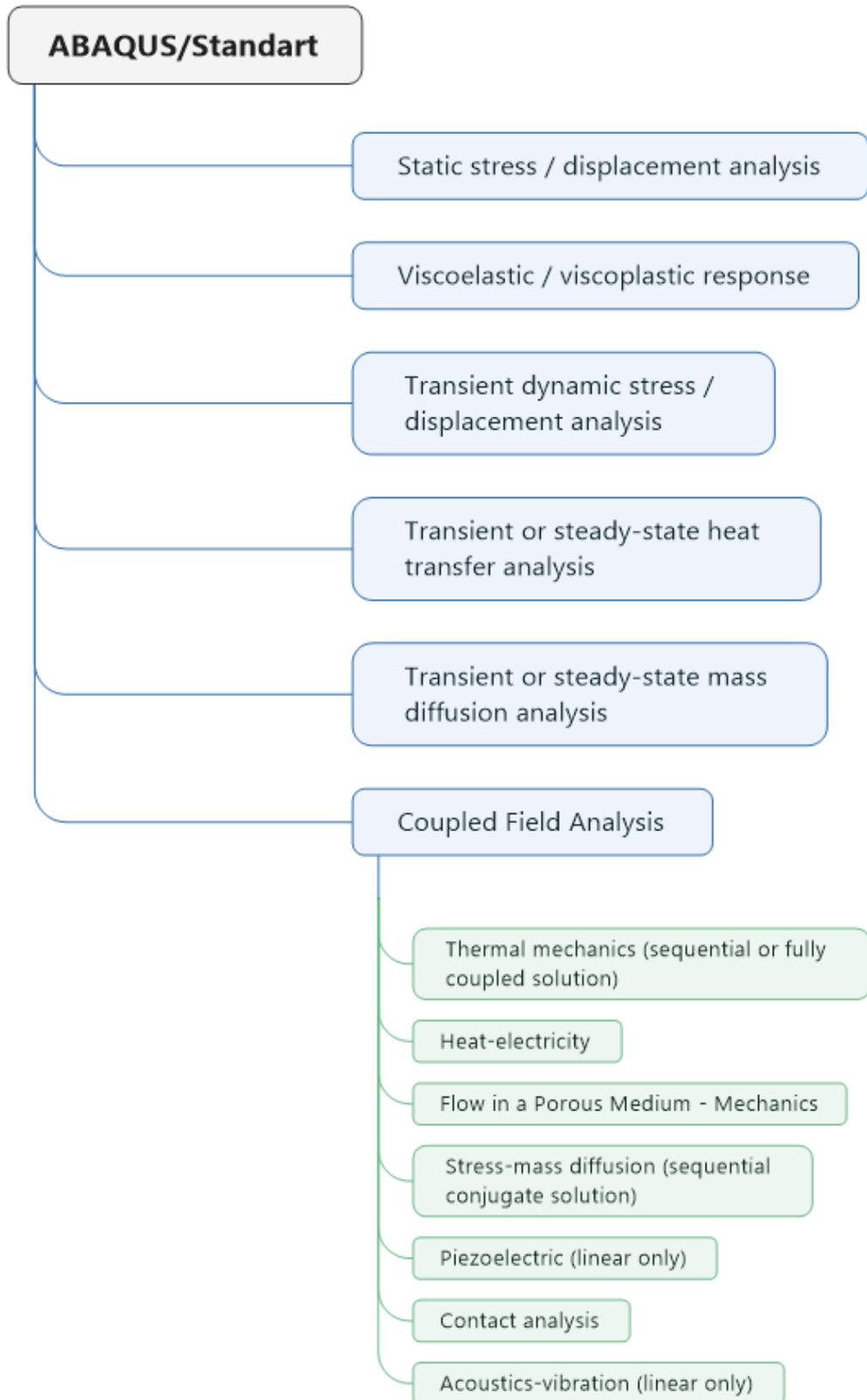


Figure 7 - Types of tasks solved by means of Abaqus / Standart

Abaqus / Explicit is a module based on an explicit integration scheme and is designed to simulate fast processes, quasi-statics, collisions, and metal pressure processing.

Abaqus / Explicit allows you to solve the following types of problems:

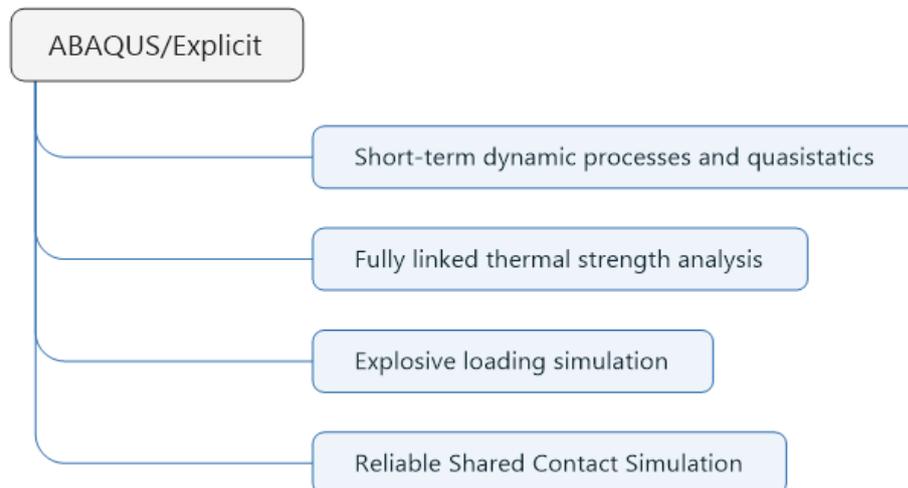


Figure 8 - Types of tasks solved by means of Abaqus/Explicit

Abaqus/Design - a module that allows topological and parametric optimization of structures.

Abaqus/Aqua is a module for modeling the load on structures (cables, pipelines and trusses) in the water.

Abaqus / CAE - a module for preparing a model for calculation, as well as processing the results of calculations carried out in Abaqus / Standart and Abaqus / Explicit.

FE - Safe is a module designed to analyze the durability of structures as well as to simulate the growth of cracks.

Abaqus for CATIA V5 - a module integrated into the CATIA V5 graphical shell allows you to quickly make changes to the analysis during product design.

## **Wear in ABAQUS**

Unlike ANSYS, to simulate wear in the Abaqus system, you need:

- User Subroutine (UPF) Connections which are not available in the student version of Abaqus.
- Availability of the Fortran compiler installed on the PC.

An example of modeling car tire wear in the Abaqus system is presented in the article [14].

### 1.3.3 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics is a universal software platform for computer simulation of physical processes using the finite element method. Modules of interdisciplinary analysis are available for modeling. The software package includes an environment for developing custom applications [13].

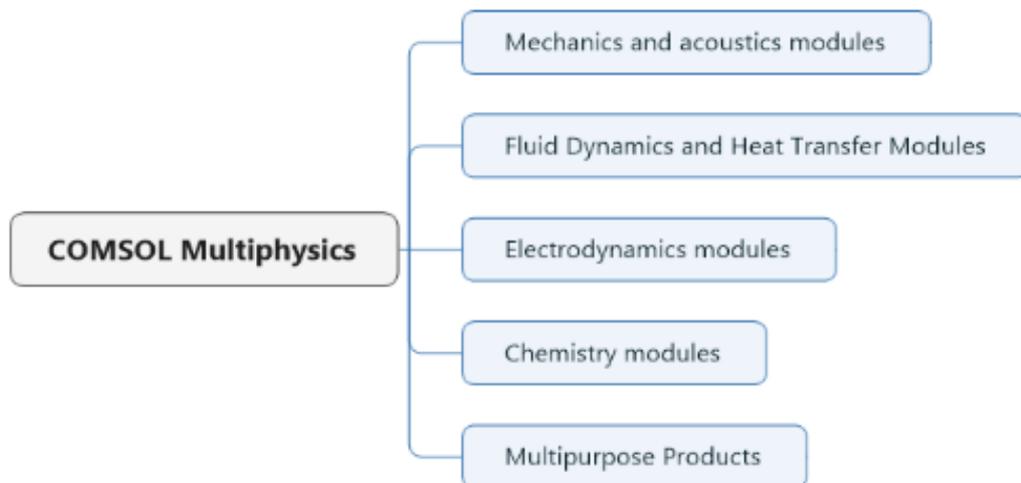


Figure 9 - COMSOL Multiphysics

The mechanics and acoustics module allow you to solve the following tasks:

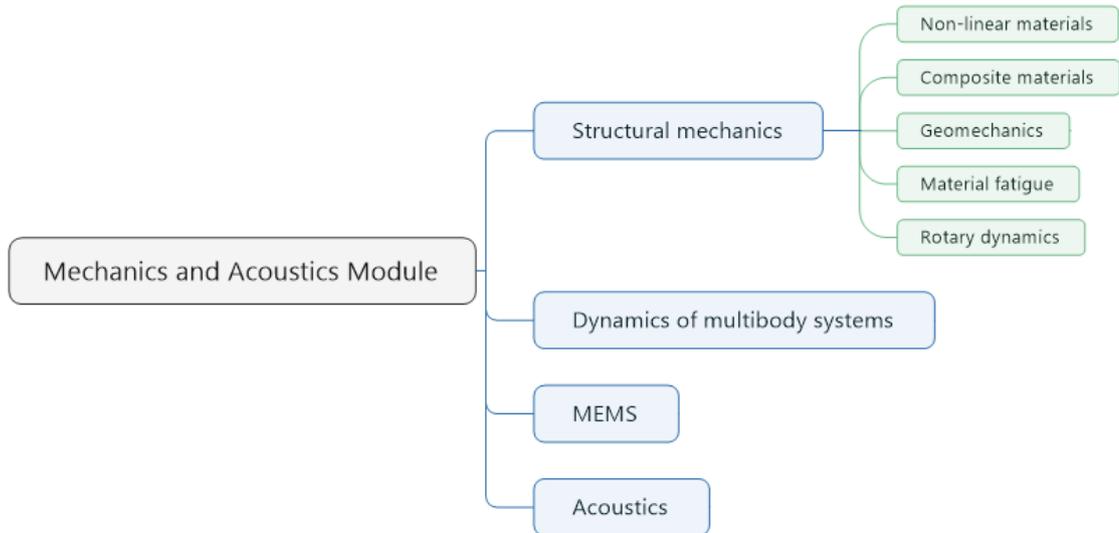


Figure 10 – Mechanics and Acoustics Module COMSOL Multiphysics

The Fluid Dynamics and Heat Transfer Module allows you to solve the following tasks:

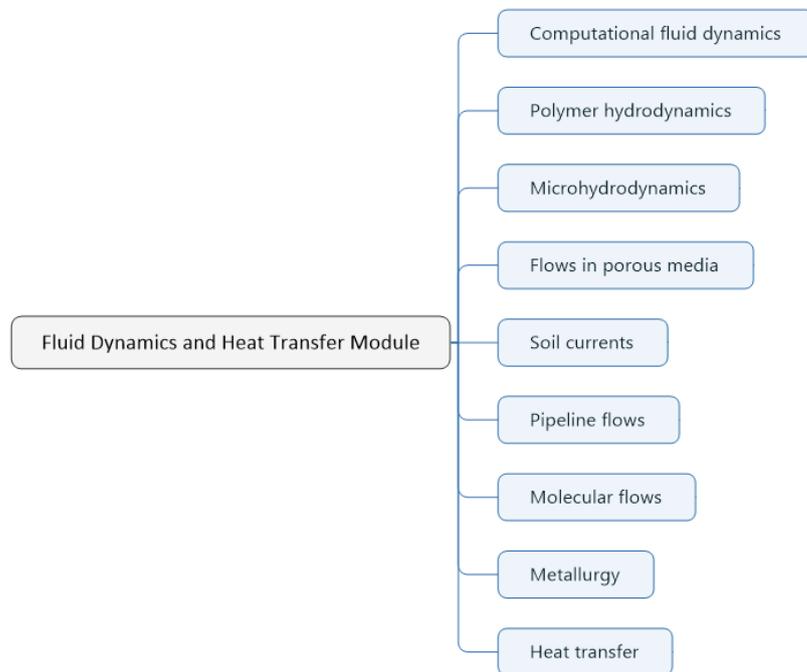


Figure 11 – Fluid Dynamics and Heat Transfer Module COMSOL Multiphysics

The electrostatics module is focused on solving the following tasks:

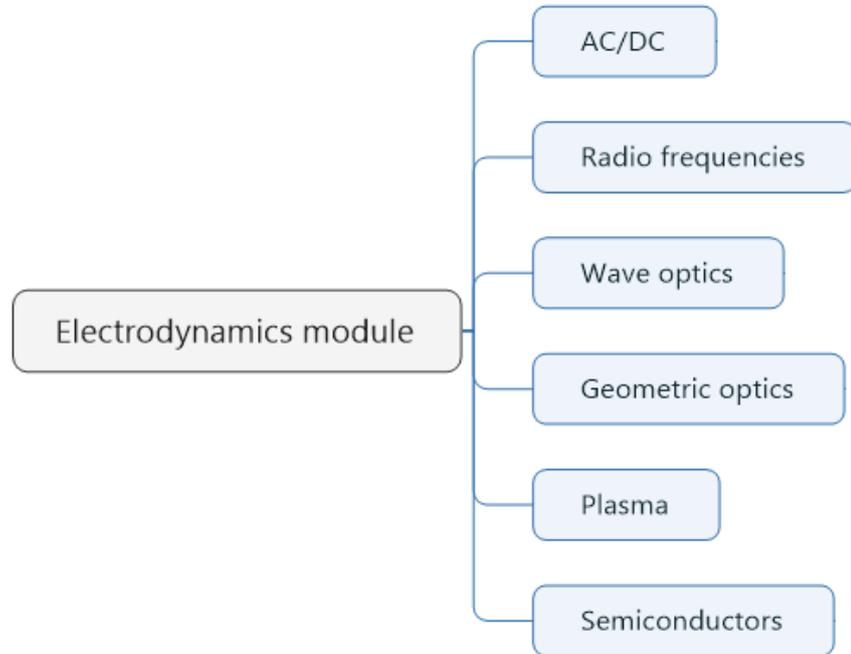


Figure 12 - Electrodynamics module COMSOL Multiphysics

The COMSOL Multiphysics Chemistry Module addresses the following types of problems:

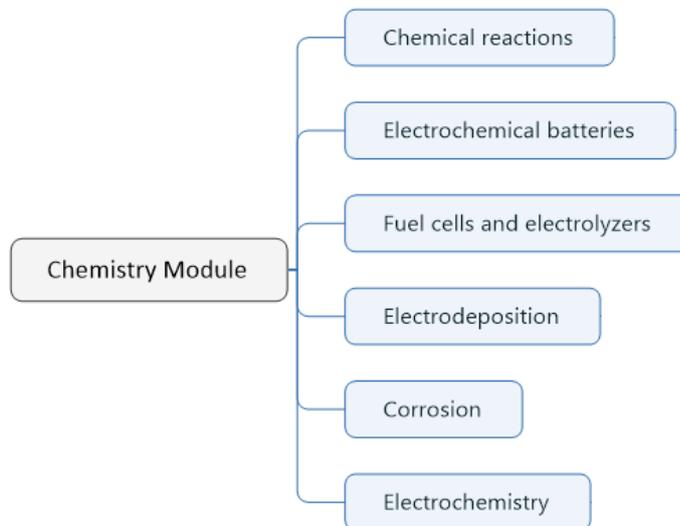


Figure 13 - Chemistry Module COMSOL Multiphysics

Many target products are represented by modules:

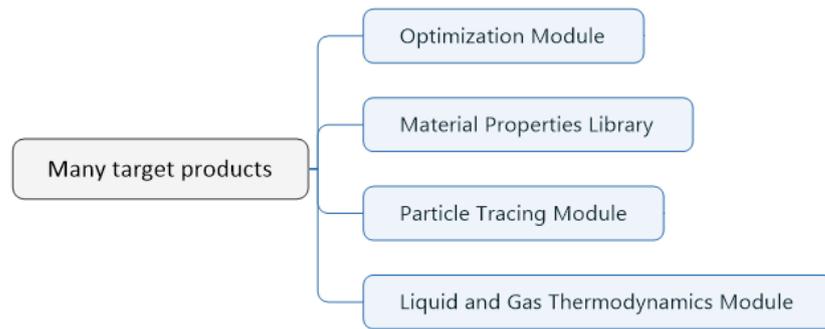


Figure 14 - Many target products of COMSOL Multiphysics

### Wear in COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics uses the Archard model to simulate wear. An example of modeling wear for a friction pair "brake disc - pads" is presented in the article [15].

#### 1.3.4. Comparison and selection of a computer wear simulation tool

Table 1 - Comparison of computer means of wear modeling

Parameter	ANSYS	Abaqus	COMSOL Multiphysics
The presence of modeling of wear by built-in means of the program	+	-	+
Setting your own wear model	Compiler required Fortran	Compiler required Fortran	?
Available Student License Features	128000 nodes/elements	1000 nodes/elements	no student license

Based on the comparison shown in Table 1, ANSYS is selected to simulate wear.

**Приложение Б**  
Командная вставка на APDL для активации износа

PINCID=CID

K1=1.75E-05

H1=1

m1=1

n1=1

c5=0

TB,WEAR,PINCID,,,ARCD

TBFIELD,TIME,0

TBDATA,1,0,1,1,0,0

TBFIELD,TIME,1

TBDATA,1,0,1,1,0,0

TBFIELD,TIME,1.01

TBDATA,1,K1,H1,m1,n1,c5

TBFIELD,TIME,10

TBDATA,1,K1,H1,m1,n1,c5