

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

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление 12.03.02 Оптика  
 Отделение материаловедения

### ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы
<b>Измерение оптического поглощения с наноразмерным разрешением</b>

УДК 535.34.08:681.72

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Степанищева Дарья Игоревна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Шерemet Евгения Сергеевна	PhD		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф-м.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оплотехники
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оплотехники
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<b><i>Универсальные компетенции</i></b>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оплотехники
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

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

Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»  
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП «Оптотехника»  
ОМ ИШНПТ

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_  
(Дата)      Степанов С.А.  
(Ф.И.О.)

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

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4В51	Степанищевой Дарье Игоревне

Тема работы:

Измерение оптического поглощения с наноразмерным разрешением	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Литература по теме ВКР. Объект исследования - Метод определения оптического поглощения с наноразмерным разрешением nano-vis.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. проектирование и сборка установки для измерения методом nano-vis</li> <li>2. усиление электрического поля вокруг зонда АСМ на оптических частотах</li> <li>3. измерение теплового расширения и анализ полученных изображений nano-vis</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>калибровочная кривая амплитуды зонда АСМ и толщины пленки; изображения nano-vis</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Л. А. Скачкова</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>В. С. Николаенко</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Е. С. Шерemet	PhD		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Д. И. Степанищева		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Степанищевой Дарье Игоревне

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление	12.03.02 Оптотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Материальные расходы 4600 руб. Зарботная плата 58 900 руб. Бюджет НИИ 99 000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф электроэнергии 5,8 руб., норма амортизации 20%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 27,1 %, районный коэффициент для г.Томска равен 1,3

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ потенциальных потребителей научного исследования, оценка перспектив дальнейшего развития
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Расчет бюджета НИИ и затрат на его исполнение
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка ресурсосберегающей эффективности исследования

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. График проведения и бюджет НИ
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Степанищева Дарья Игоревна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Степанищевой Дарье Игоревне

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	12.03.02 Оптотехника

Тема ВКР:

Измерение оптического поглощения с наноразмерным разрешением	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – метод определения оптического поглощения с наноразмерным разрешением nano-vis. Область применения – изучение оптических свойств наноструктур
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Отклонение параметров микроклимата</li> <li>– Отсутствие или недостаток естественного света</li> <li>– Недостаточная освещенность</li> <li>– Опасность поражения электрическим током</li> <li>– Повышенное значение электромагнитного излучения</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– анализ влияния объекта исследования на окружающую среду
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения: пожар;

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Степанищева Дарья Игоревна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 64 с., 14 рис., 12 табл., 31 источник.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, оптическое поглощение, тепловое расширение, наноразмерное разрешение.

**Объектом исследования** являются изображения, полученные методом nano-vis.

**Цель исследования:** создание и юстировка установки nano-vis, проверка ее работоспособности и анализ полученных изображений.

**Метод проведения работы:** проводился обзор литературы, содержащей информацию о схожих методах исследованиях; собиралась экспериментальная установка для проведения исследований методом nano-vis: подготовка оптической схемы, проектирование недостающих деталей и их дальнейшая печать на 3D-принтере; проводились измерения оптического поглощения образцом с помощью оптической измерительной головки атомно-силового микроскопа и анализ полученных результатов; был проведен анализ работы с точки зрения экономики; анализировался процесс исследования с точки зрения социальной ответственности: соблюдение техники безопасности при проведении экспериментов, влияние работы на окружающую среду и др.

**Полученные результаты:** в ходе данной выпускной квалификационной работы была спроектирована и собрана установка nano-vis, проведены измерения оптического поглощения с последующим анализом.

**Степень внедрения:** метод проведения исследований nano-vis может найти применение в исследовании оптических свойств наноструктур, таких как наноантенны, солнечные батареи и др.

## **Определения**

В данной выпускной квалификационной работе используются следующие термины:

Пьезоэлектрик – материал, обладающий пьезоэлектрическими свойствами, то есть индуцирующий электрический заряд под действием деформации или деформирующийся под действием внешнего электрического поля.

Поверхностные плазмоны – поверхностные электромагнитные волны, которые распространяются в направлении, параллельном границе раздела металл – диэлектрик, и сильно локализованы у границы раздела сред.

## **Обозначения и сокращения**

СЗМ – сканирующая зондовая микроскопия;

АСМ – атомно-силовая микроскопия;

СТМ – сканирующая туннельная микроскопия;

БОМ – ближнепольная оптическая микроскопия;

3D-печать – трехмерная печать;

ПЭТ-Г – полиэтилентерефталат-гликоль;

nano-vis – метод измерения оптического поглощения на основе АСМ.



## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>10</b>
<b>Глава 1 Обзор литературы .....</b>	<b>12</b>
1.1 Сканирующая зондовая микроскопия.....	12
1.1.1 Ближнепольный оптический микроскоп. ....	13
1.1.2 Сканирующий туннельный микроскоп. ....	14
1.1.3 Атомно-силовой микроскоп.....	15
1.2 Методы наноспектроскопии на основе АСМ.....	16
<b>Глава 2 Теоретический анализ.....</b>	<b>19</b>
2.1 Методы исследования.....	19
2.2 Оборудование .....	20
2.2.1 Проектирование и изготовление деталей для измерительной установки..	21
2.3 Измерение оптического поглощения .....	22
<b>Глава 3 Результаты.....</b>	<b>24</b>
<b>Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....</b>	<b>28</b>
<b>Глава 5 Социальная ответственность .....</b>	<b>41</b>
<b>Заключение.....</b>	<b>55</b>
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>56</b>
<b>Приложение А .....</b>	<b>59</b>

## Введение

С развитием технологий объекты современного производства становятся все более сложными, а структуры все меньших размеров. Вместе с этим растут требования к экспериментальным и исследовательским методам. Чтобы исследовать объекты, процессы и свойства материалов, которые предлагает нам производство, требуются высокоточные методы с беспрецедентным пространственным и временным разрешением.

Методы оптической микроскопии и спектроскопии дают информацию о структуре образца, его химическом составе и оптических свойствах. В классических оптических методах микроскопии разрешение ограничено дифракционным пределом – минимальным размером пятна рассеяния, которое получено при фокусировке электромагнитного излучения. Дифракционный предел приблизительно равен половине длины волны ( $\lambda/2$ ), и обычный оптический микроскоп не способен различать объекты исследования, расстояние между которыми меньше этого значения. В связи с этим существует множество способов преодолеть или обойти данный барьер. Один из таких способов – это класс методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). А при комбинации методов СЗМ с оптическим возбуждением и детектированием возможно реализовать методы нанооптики и наноспектроскопии. Они являются инструментами для получения знаний о свойствах материалов, таких как химический состав или оптические свойства. В данной выпускной квалификационной работе эксперименты проведены при помощи одного из таких методов – методом *pano-vis*, который работает на основе атомно-силового микроскопа. Данный метод позволяет получить сведения об оптических свойствах исследуемого объекта.

Целью настоящей работы является получение работающей установки и дальнейшее исследование изображений, полученных методом *pano-vis*. Для выполнения цели необходимо выполнить следующие задачи:

- обзор литературы по теме исследования;
- обучение работе с атомно-силовым микроскопом;

- изготовление и юстировка оптической системы возбуждения атомно-силового микроскопа;
- измерение структур методом nano-vis;
- анализ полученных результатов.

## Глава 1 Обзор литературы

### 1.1 Сканирующая зондовая микроскопия.

На сегодняшний день едва ли не каждое исследование тонкопленочных и наноразмерных образцов происходит при помощи сканирующей зондовой микроскопии. Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) – это приборы, которые позволяют исследовать нанорельеф поверхности, а также отдельные свойства образца.

СЗМ имеют несколько обязательных составляющих – зонд, система перемещения зонда и регистрирующая система.

Такие микроскопы основаны на взаимодействии зонда, наконечника в виде иглы с острием размером  $\approx 10$  нм, с поверхностью образца и позволяют получить трехмерное изображение поверхности с высоким разрешением. Контролировать расстояние между зондом и образцом, составляющее величину 0,1 – 10 нм, и изменять положение зонда с необходимой точностью позволяет специальный сканер или сканирующий элемент, который изготавливается из пьезоэлектриков. Пьезоэлектрик – это поляризованный поликристаллический материал, который изменяет свои размеры под действием внешнего электрического поля.

Процесс сканирования поверхности происходит во время движения зонда по прямой линии в прямом и обратном направлении при помощи сканера. Обычно регистрация данных о поверхности совершается в прямом ходе [1].

Взаимодействие поверхности исследуемого объекта и зонда характеризуется определенным параметром. Если имеется зависимость данного параметра от расстояния между зондом и образцом, то такой параметр используется для системы обратной связи. Схематично данный принцип изображен на рисунке 1, где  $P$  – параметр, характеризующий взаимодействие зонд-поверхность,  $P_0$  – заданное оператором значение параметра  $P$ , которое поддерживает система обратной связи.

При изменении расстояния происходит изменение параметра  $P$ . Таким образом, возникает разностный сигнал  $P - P_0$ . Далее сигнал подается на

исполнительный элемент (ИЭ), который приближает или отдаляет зонд от образца, пока сигнал  $P - P_0$  не станет равен 0.

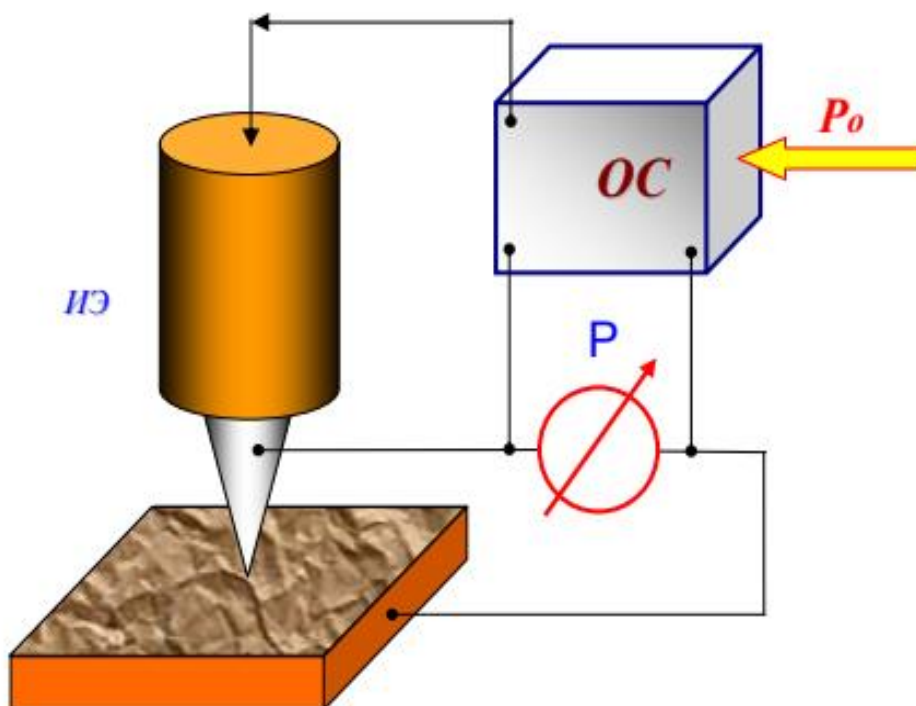


Рисунок 1 – Общая схема принципа обратной связи сканирующих зондовых микроскопов. [1]

При перемещении зонда происходит изменение параметра  $P$  из-за рельефа поверхности. Система ОС обрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности.

Основными видами сканирующих зондовых микроскопов являются атомно-силовой микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп и ближнепольный оптический микроскоп. [2]

### 1.1.1 Ближнепольный оптический микроскоп.

В ближнепольном оптическом микроскопе (БОМ) при помощи зонда локализуется электромагнитное поле в области, размер которой меньше длины

волны излучения. Для локализации электромагнитного поля используют два метода: апертурный и безапертурный.

В первом случае для освещения объекта или обнаружения сигнала используется апертура, размер которой  $\approx 100\text{нм}$ , что существенно меньше длины волны (рис.2а). Обычно используются зонды с апертурой на конце на основе оптического волокна.

Во втором случае зонд подносят к исследуемой поверхности, освещенной в режиме полного внутреннего отражения либо через апертуру на расстояние меньше длины волны. [1, 2, 3]

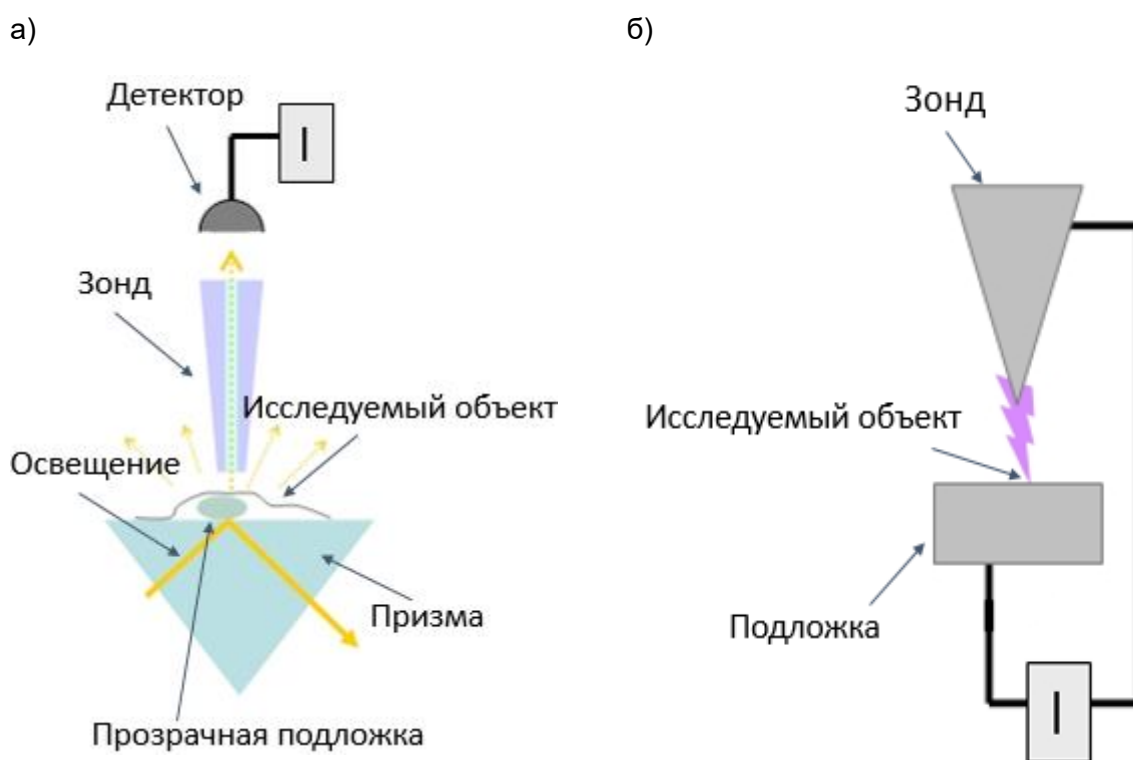


Рисунок 2 – а) Схема ближнепольного оптического микроскопа, апертурный метод исследования; б) схема сканирующего туннельного микроскопа. \*Иллюстрация [<http://kristian.molhave.dk> Kristian Molhave]

### 1.1.2 Сканирующий туннельный микроскоп.

Первым зондовым микроскопом стал сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). СТМ исследует образец при помощи металлического зонда,

который подводится к образцу на расстояния в несколько десятых нанометров (рис.2б).

При подаче на зонд напряжения возникает туннельный ток, который экспоненциально зависит от расстояния между образцом и зондом. Во время сканирования зонд перемещается по поверхности, показания следящей системы меняются в соответствии с ее рельефом. При помощи сканирующего туннельного микроскопа можно исследовать только проводящие материалы. [2]

### 1.1.3 Атомно-силовой микроскоп.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) способен не только сканировать, а также управлять атомами.

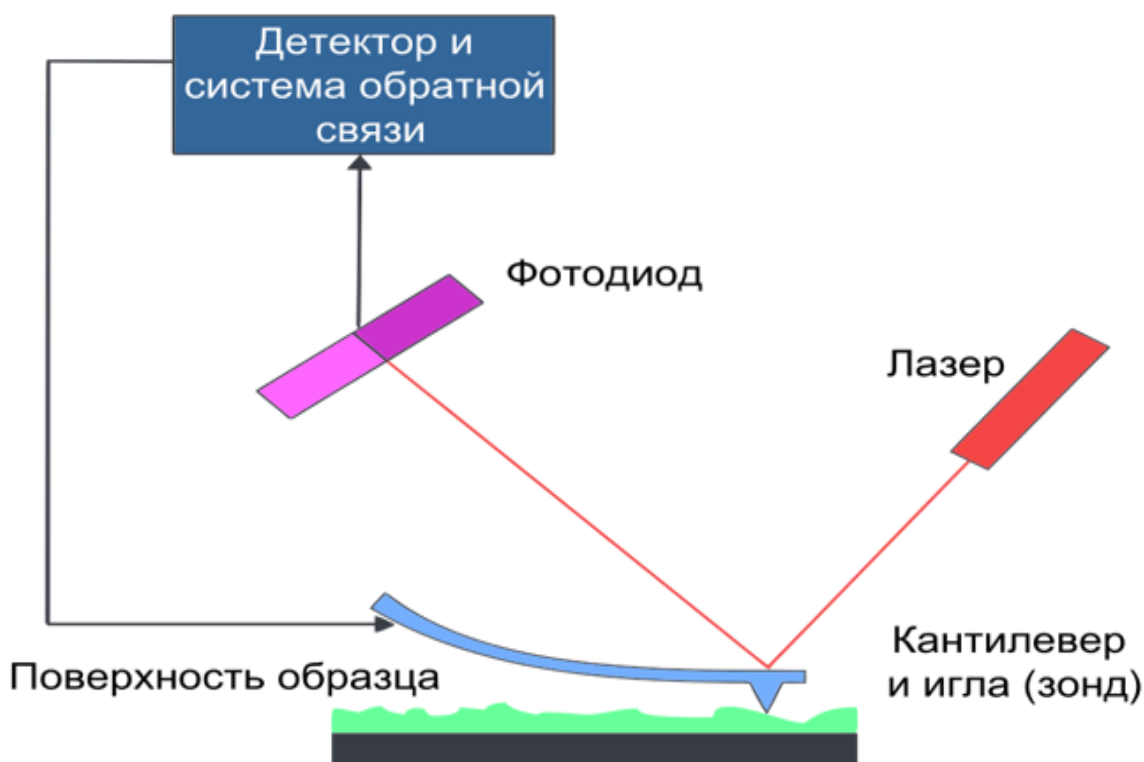


Рисунок 3 – Схема атомно-силового микроскопа. \*Источник: Сканирующий зондовый микроскоп [Электронный ресурс]: интернет-энциклопедия URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сканирующий\\_зондовый\\_микроскоп](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сканирующий_зондовый_микроскоп) (Дата обращения 15.12.2018)

В качестве зонда в атомно-силовом микроскопе используется острое размером в несколько нанометров, которое находится на конце консоли (кантилевера). Когда зонд взаимодействует с поверхностью, кантилевер изгибается. Появление впадин и возвышенностей приводит к изменению изгиба, величина которого регистрируется при помощи отраженного от кантилевера лазерного излучения и фотодетектора (рис.3). Таким образом, можно получить трехмерное изображение поверхности образца. [2, 4]

Существует 3 режима сканирования АСМ: контактный, бесконтактный и полуконтактный режимы. В первом режиме расстояние между зондом АСМ и поверхностью образца составляет несколько десятых нанометров, т.е. зонд и образец находятся в физическом контакте. При этом во время сканирования кантилевер изгибается из-за неровностей рельефа поверхности образца.

При бесконтактном режиме кантилевер не находится в прямом контакте с поверхностью, а колеблется над образцом с амплитудой около 2 нм. Расстояние между зондом и поверхностью, поддерживаемое при помощи пьезоэлектрика, не превышает величину амплитуды.

Полуконтактный метод аналогичен бесконтактному, но отличием является то, что в нижней точке колебаний зонд соприкасается с поверхностью образца. Таким образом, происходят вынужденные колебания кантилевера с амплитудой  $\approx 10-100$  нм. Использование данного метода является основой для ряда других методик, использующих резонансные колебания кантилевера.

## **1.2 Методы наноспектроскопии на основе АСМ.**

Кроме БОМ, существует множество методов для получения высокого разрешения изображения исследуемых объектов. Один из таких методов - сканирующая ближнепольная эллипсометрическая микроскопия. Этот метод сочетает в себе атомно-силовую микроскопию и эллипсометрию. Эллипсометрия - это метод, который основан на регистрации изменения состояния поляризации излучения при отражении от исследуемого образца. При падении монохроматического плоскополяризованного света на поверхность,



отраженный и преломленный пучок приобретает эллиптическую поляризацию из-за наличия тонкого переходного слоя на границе раздела двух сред.

Карагеоргиев и др. освещали образец снизу через призму полного внутреннего отражения, а поле на поверхности образца рассеивалось зондом АСМ [5]. После них Транчида и др. усиливали поле локализованных поверхностных плазмонов, используя зонд АСМ с золотым покрытием [6]. В результате экспериментов оптически достигнутое разрешение составляло около 20 нм ( $\lambda/32$ ).

В последнее время много работ основано на исследовании образцов при поглощении ими инфракрасного или видимого излучения. Поглощение света материалом приводит к тепловому расширению образца, которое измеряется наконечником атомно-силового микроскопа. Один из таких методов - спектроскопия фототермического индуцированного резонанса (PTIR - photothermal induced resonance) [7, 8]. Зонды АСМ здесь измеряют локальное тепловое расширение образца, т.е. повышение температуры [9].

Аналогично, АСМ-ИК, основанный на фототермическом расширении образца, которое регистрируется при помощи атомно-силового микроскопа. АСМ-ИК работает, используя наконечник зонда для локального обнаружения теплового расширения в образце в результате поглощения инфракрасного излучения. Таким образом, метод может обеспечить пространственное разрешение АСМ в сочетании с возможностями химического анализа и визуализации состава инфракрасной спектроскопии. Система АСМ-ИК используется для отображения распределения различных химических соединений. Поскольку используются узкополосные перестраиваемые ИК-источники, можно настроить лазер на любую конкретную полосу поглощения и затем отобразить интенсивность ИК-поглощения. Как и в классической ИК спектроскопии, по спектрам можно идентифицировать ключевые ИК-полосы поглощения, которые характерны для составляющих компонентов. Отобразить распределение химических компонентов возможно при создании изображения из отношений ИК-поглощений на разных выбранных полосах. [10]

Данный метод способен измерять тепловое расширение от 50 до 100 нм [11]. Трудности возникают, когда высота измеряемого объекта меньше, чем 100 нм. Для этого Фелтс с коллегами добились повышенной чувствительности при помощи метода WT (wavelet transform) для полимерной наноструктуры толщиной 15 нм [12]. Грузежки и др. показали разрешение 20 нм на образцах с содержанием фотосинтетического пигмент-белкового комплекса LHCP (Light-harvesting complex II) [13].

В данной работе измерения будут проводиться с использованием метода nano-vis, который, в отличие от АСМ-ИК, основан на расширении при поглощении излучения видимого диапазона. Главным преимуществом является то, что с помощью данного метода можно добиться разрешения до нескольких единиц нанометров ( $\sim 4$  нм,  $\lambda/100$ ), что значительно превышает максимальное разрешение, полученное другими способами [14]

То, что фототермического расширения можно добиться, используя видимое излучение, показали Катценмейер и др. Они добились разрешения около 20 нм [15]. Позднее при помощи подобного метода Родригесом и др. были исследованы двумерные полупроводниковые материалы и металлические многослойные углеродные нанотрубки (MWCNT - multiwalled carbon nanotubes). Разрешение составило 4 нм [14]. Основным отличием установки Родригеса и др. было использование механического модулятора, что стало возможным за счет применения плазмонных зондов с низкочастотными (менее 10 КГц) резонансными частотами.

## Глава 2 Теоретический анализ

### 2.1 Методы исследования

Объектом исследования выпускной квалификационной работы являются изображения, полученные методом *nano-vis*.

Метод *nano-vis* – метод наноспектроскопии на основе АСМ, позволяющий получить данные об оптических свойствах исследуемого образца.

В установку входит атомно-силовой микроскоп, лазер с длиной волны в видимой области и модулятор. При поглощении видимого лазерного излучения в образце возникает безызлучательная релаксация, и, следовательно, происходит локальных нагрев из-за электрон-фононного рассеяния. Расширение, вызванное этим нагревом, регистрируется атомно-силовым микроскопом. Метод позволяет делать выводы об оптических свойствах материалов, так как расширение материала зависит от его способности поглощать определенный спектр излучения лазера и от температуры нагрева. При деформациях при помощи модулятора создается прерывистое освещение. Использование металлических или покрытых металлом зондов атомного-силового микроскопа, которые поддерживают локализованный поверхностные плазмоны, является дополнительным преимуществом при усилении электромагнитного поля. Т.к. зонд имеет радиус не более 50 нм, усиление происходит в очень маленькой области и, соответственно, приводит к локальному нагреву образца.

Физические процессы, лежащие в основе метода *nano-vis* показаны на рисунке 5: (1) фотон с энергией, значительно превышающей запрещенную зону, возбуждает электрон из валентной зоны до более высокого энергетического уровня (2) в зоне проводимости, безызлучательная релаксация (3), опосредованная электронным фооном рассеяние вызывает (4) тепловыделение, которое приводит к тепловому расширению образца (5) и отклонению кантилевера (6).

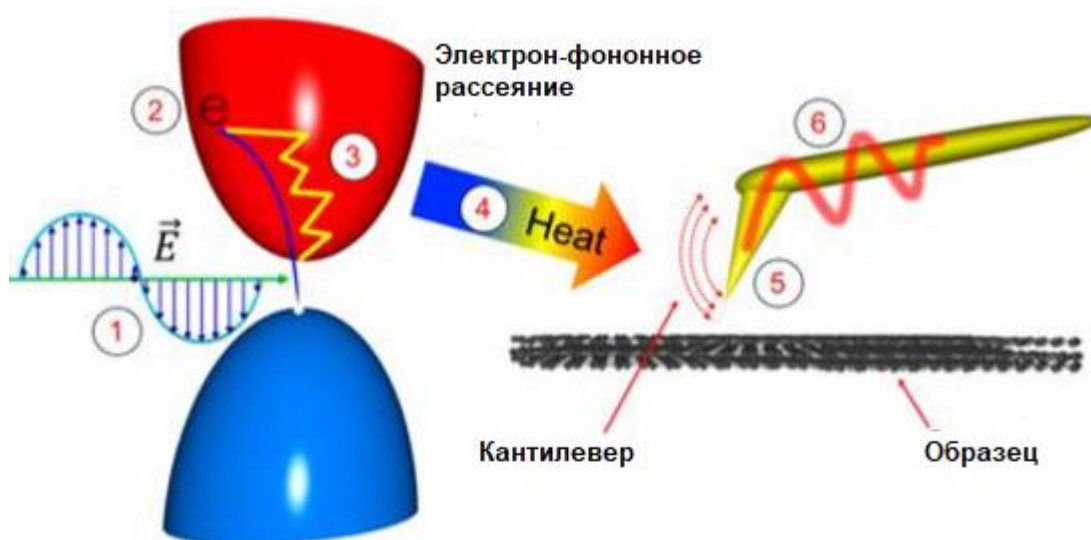


Рисунок 5 – Физические процессы, лежащие в основе nano-vis [15]

## 2.2 Оборудование

Проведение измерений происходит на установке, главным компонентом которой является научно-технический комплекс (НТК) – атомно-силовой микроскоп (рис.6а). Схематично установка изображена на рисунке 6б.

а)



б)

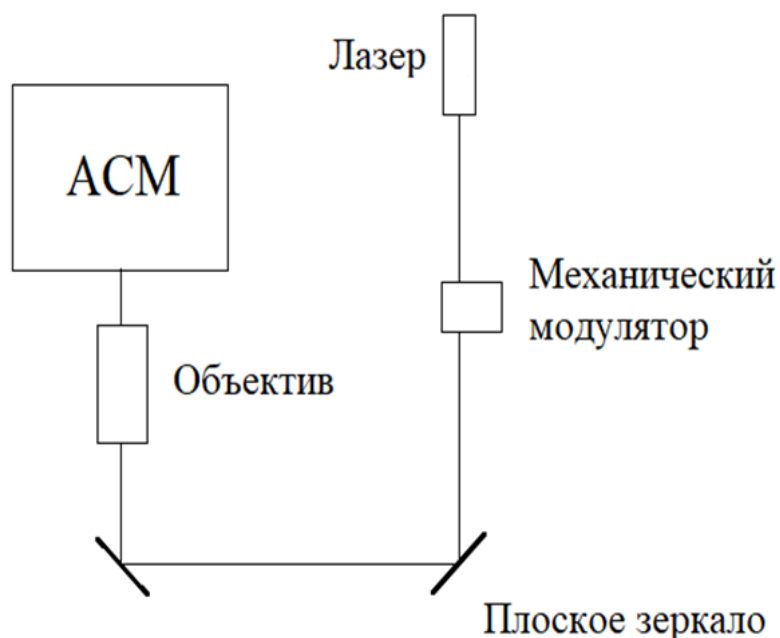


Рисунок 6 – а) научно-технический комплекс (НТК); б) Схема установки для проведения экспериментов

Как уже говорилось выше, при поглощении излучения материал испытывает тепловое расширение. Для того, чтобы добиться максимальной чувствительности метода, используется модулированное лазерное излучение.

### **2.2.1 Проектирование и изготовление деталей для измерительной установки**

Для проведения фокусировки лазерного пятна на фонде АСМ было необходимо: подвести лазерное излучение к зонду оптической головки атомно силового микроскопа. Для этого нужно было спроектировать недостающие детали и напечатать их с использованием 3D-принтера.

Для проектирования деталей была использована система автоматизированного проектирования «SolidWorks 2016». Данная программа позволяет разработку изделий любой сложности и назначения. Построенные в данной программе трехмерные модели в дальнейшем используются для 3D-печати. Разработанные модели представлены в Приложении А.

3D-печать – это одна из разновидностей аддитивного производства, т.е. метода создания деталей и прототипов, который основывается на поэтапном добавлении материала на основание (плоскую платформу, осевую заготовку). Для печати используется 3D-принтер – это станок, создающий трехмерные модели методом послойного создания детали. Устройство такого станка изображено на рисунке 4, и составляющими являются корпус (1), закрепленные на корпусе направляющие (2), перемещающаяся печатающая головка (3), шаговые двигатели (4), рабочий стол (5), управление (6)

В данной работе трехмерная печать выполняется на 3D-принтере «Anycubic I3 Mega» (рис.5а). Готовую деталь можно увидеть на рисунке 5б – держатель объектива, включенный в установку.

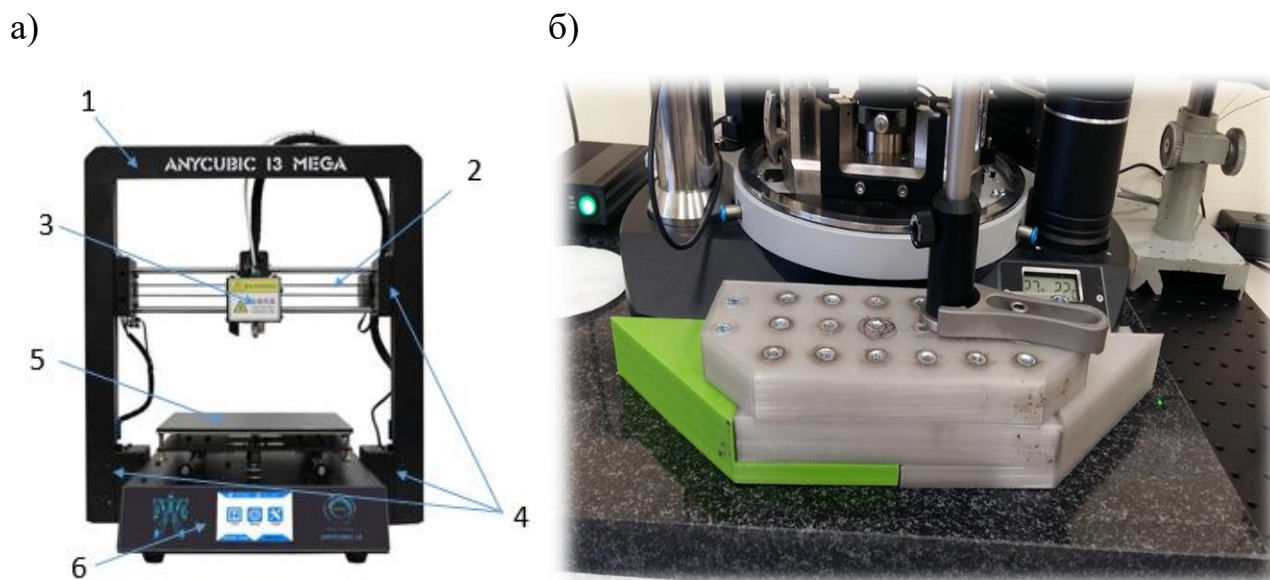


Рисунок 4 – а) 3D-принтер Anycubic I3 Mega; б) держатель для подвода объектива

В качестве материала для печати был выбран полиэтилентерефталат-гликоль – ПЭТ-Г или сополиэфир ПЭТ (полиэтилентерефталат). Данный пластик – модифицированная версия ПЭТ, самого используемого пластика в мире. ПЭТ-Г прочный, термостойкий, долговечный, легкий в использовании и не искажает размеры моделей при усадке, что является важным в данной работе.

### 2.3 Измерение оптического поглощения

Для облучения образца использовался зеленый диодный лазер с длиной волны 532 нм. Далее происходит модуляция пучка при помощи механического модулятора. Частота модуляции = 13,6 кГц. Пучок фокусировался при помощи объектива MITUTOYO M PLAN 20X LWD со следующими характеристиками:

- Оптическое увеличение = 20х
- Фокусное расстояние = 20 мм
- Разрешающая способность = 0,7 мкм

Последующее сканирование образца происходит с помощью золотого или покрытого золотом зонда, радиус которого  $\approx 50$  нм.

При облучении модулированным лазером образец нагревается незначительно, поэтому дополнительным нагревом также служит зонд, который

нагревает локальную область поверхности благодаря усилению электромагнитного поля на кончике зонда. Модулированное излучение используется для того, чтобы увеличить амплитуду колебаний зонда, что повышает чувствительность метода. Во время сканирования зонд колеблется на определенной частоте, и при его облучении модулированным излучением с такой же частотой возникает резонанс, тем самым «раскачивая» кантилевер, что увеличивает амплитуду колебаний.

## **Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» - создание конкурентоспособных разработок и технологий, которые отвечают современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Сегодня перспективность научной разработки в первую очередь обусловлена её коммерческой ценностью. Для коммерческой привлекательности научного исследования недостаточно только повышения технических параметров по сравнению с предыдущими разработками. Важно то, насколько быстро разработчик сумеет найти ответ на вопрос – будет ли продукт востребован рынком. [16]

Производство все чаще предлагает объекты микро и нано размеров. Для того, чтобы исследовать такие объекты, а также процессы и свойства материалов, требуются высокоточные методы исследования. В данной работе представлен один из таких методов – nano-vis.

Цель данного экономического раздела – определение успешности и целесообразности научно-исследовательской работы.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- оценка коммерческого и инновационного потенциала, перспективности проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.
- разработка сметы на организацию исследования;
- оценка ресурсной и экономической эффективности.



#### **4.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Метод nano-vis основан на сканирующей зондовой микроскопии. Такие методы позволяют исследовать объекты с высокой точностью и высоким пространственным и временным разрешением.

В настоящее время сканирующий зондовые микроскопы нашли применение практически во всех областях науки. В физике, химии, биологии используют в качестве инструмента исследования атомно-силовой микроскоп. В частности, такие междисциплинарные науки, как биофизика, материаловедение, биохимия, фармацевтика, нанотехнологии, физика и химия поверхности, электрохимия, исследование коррозии, электроника, фотохимия и многие другие. Перспективным направлением считается совмещение сканирующих зондовых микроскопов с другими традиционными и современными методами исследованиями.

В данных методах нуждаются производители, которые заинтересованы в усовершенствовании своей продукции, в поиске новых, более удобных и экономически выгодных материалов.

#### **4.2 Планирование научно-исследовательских работ**

Предполагаемые работы планируются следующим образом:

1. определение структуры работ в рамках научного исследования;
2. определение участников каждой работы;
3. установление продолжительности работ.

##### **4.2.1 Структура и порядок работ научного исследования**

Участниками данного исследования являются профессор отделения материаловедения (или научный руководитель), студент группы 4B51. Каждой выполняемой работе соответствует исполнитель, обладающий определенной должностью.

Таблица 1 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка задания ВКР	1	Определение направления исследования	Руководитель
	2	Составление задания	Руководитель
	3	Согласование задания с исполнителем	Руководитель, студент
Выбор направления исследований	4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических обоснований	Руководитель, студент
	7	Разработка технологии изготовления	Студент
	8	Изготовление	Студент
	9	Ознакомление с методами оптического анализа	Руководитель, студент
	10	Оптический анализ	Студент
	11	Оптимизация параметров	Студент
	12	Сравнение результатов экспериментов с	Студент

		теоретическими исследованиями	
Обобщение и оценка результатов	13	Оценка эффективности полученных результатов	Студент, руководитель
Оформление отчета по НИР	14	Представление результатов для отчета по НИР	Студент
	15	Анализ результатов отчета, выводы	Студент

#### 4.2.2 Определение трудоемкости работ

Так как трудовые затраты составляют основную часть стоимости разработки, трудоемкость определяется для каждого из участников исследования экспертным путем в человеко- днях по следующей формуле:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мин i} + 2t_{макс i}}{5},$$

где  $t_{ожи}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ - ой работы чел.-дн.;  $t_{мин i}$ - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{макс i}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Работы руководителя и студента выполняются параллельно, тогда продолжительность одной работы будет равна:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожи}}{Ч_i},$$

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

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

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

Переведем длительность каждого из этапов в календарные дни:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

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

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

$k_{\text{кал}}$ - коэффициент календарности.

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кг}} - T_{\text{вг}} - T_{\text{пг}}} = \frac{365}{365 - 57} = 1,19$$

где  $T_{\text{кг}}$ - кол-во календарных дней в году;

$T_{\text{вг}}$ - кол-во выходных дней в году;

$T_{\text{пг}}$ - кол-во праздничных дней в году.

Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Временные показатели научного исследования

№ раб.	Содержание работ	$t_{\min}$ , дн.	$t_{\max}$ , дн.	$t_{\text{ож}}$ , чел.- дн.	$T_{pi}$ , раб. дн.	Продолжит ельность, календ. дн.
1	Определение направления исследования	1	3	1,8	0,9	1
2	Составление задания	2	3	2,4	1,2	1
3	Согласование задания с исполнителем	1	2	1,4	0,7	1
4	Подбор и изучение материалов по теме	5	7	5,8	2,9	3
5	Календарное планирование работ по теме	2	3	2,4	1,2	2
6	Проведение теоретических обоснований	3	5	3,8	1,9	3

7	Разработка технологии изготовления	9	13	10,6	5,3	6
8	Изготовление	2	4	2,8	1,4	2
9	Ознакомление с методами экспериментов	3	5	3,8	1,9	3
10	Эксперименты	2	3	2,4	1,2	2
11	Оптимизация параметров	4	6	4,8	2,4	3
12	Сравнение результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	2	3	2,4	1,2	2
13	Оценка эффективности полученных результатов	2	3	2,4	1,2	2
14	Представление результатов для отчета по НИР	14	20	16,4	8,2	10
15	Анализ результатов отчета, выводы	5	8	6,2	3,1	4
Итого						45

#### 4.3. Бюджет научно- технического исследования

В этом разделе необходимо достоверно отобразить абсолютно все вид расходов, которые были произведены во время выполнения научно-технического исследования. Затраты группируются по следующим статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для экспериментов;

- основная зарплата исполнителей задания;
- дополнительная зарплата;
- страховые отчисления;
- накладные расходы.

#### 4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ

В этом разделе должны быть учтены все материалы, которые использовались при выполнении задания. Это может быть сырье и материалы, которые требуются для выполнения исследования, покупные материалы для полного функционального обеспечения процесса, запасные части и приспособления, а также считаются затраты на канцелярские принадлежности, картриджи и т.д.

В данной работе конкретно для исследования никаких затрат, кроме канцелярских, не осуществлялось, то есть все необходимое уже было в наличии.

Расчет материальных затрат производится по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расх\ i},$$

где  $m$ - количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расх\ i}$ - количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования;

$Ц_i$ - цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов;

$k_T$ - коэффициент, который учитывает транспортно- заготовительные расходы.

Материальные затраты, произведенные для выполнения данного научно-технического исследования, представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Материальные затраты

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Электроэнергия	кВт/ч	50	2,7	135
3D-печать	шт.	3	500	1500
Пластик	кг	3	1000	3000
Канц. товары				165
Итого:				4800

#### 4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментов

В данном разделе учитываются все затраты, которые связаны с приобретением оборудования, необходимого для проведения работ по исследовательской работе. Но для данного исследования оборудование отдельно не приобреталось, поэтому следует рассчитать амортизацию оборудования, которое уже было в наличии и использовалось для экспериментов.

Расчет амортизации производится по следующей формуле:

$$З_{об} = \frac{(Ц \cdot F_{\phi})}{(F_{н} \cdot F_{cc})},$$

где Ц- цена оборудования, руб.;

$F_{н}$ - номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч.;

$F_{cc}$ - срок службы оборудования, год;

$F_{\phi}$ - фактическое время занятости оборудования в ВКР, ч.

$$F_{н} = (365 - T_{вых}) \cdot t_{раб} = (365 - 118) \cdot 8 = 1976 \text{ ч}$$

Амортизация использовавшегося оборудования:

Таблица 4 – Затраты на амортизацию оборудования

№ п/ п	Наименование оборудования	Цена ед. оборудовани я,	Срок службы, год	Время занятости, ч.	Затраты на амортизацию, руб.
--------------	------------------------------	-------------------------------	------------------------	---------------------------	------------------------------------

		руб.			
3	Компьютер	30 000	4	400	1000
Итого:					1000

#### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается основная заработная плата всех участвующих в выполнении работы дипломной работы. Данные об окладе в зависимости от трудоемкости работ служат основой для расчета заработной платы.

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн.}} \cdot T_p,$$

где  $T_p$ - продолжительность работ, выполняемых научно- техническим сотрудником, раб. дн.;  $З_{\text{дн.}}$ - среднедневная заработная плата сотрудника, руб.

$$З_{\text{дн.}} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где  $З_m$ - месячный оклад сотрудника, руб.;  $M$  - количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_d$ - действительный годовой фонд времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 5 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней -выходные дни; -праздничные дни	56	56
Потери рабочего времени -отпуск -невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	261	261



Месячный должностной оклад сотрудника рассчитывается следующим образом:

$$З_m = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, (10)$$

где  $З_{тс}$ - заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{пр}$ - премиальный коэффициент, равный 0,3;  $k_d$ - коэффициент доплат и надбавок в диапазоне от 0,2-0,5;  $k_p$ - районный коэффициент равный 1,3.

Таблица 6 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	$k_t$	$З_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$З_m$	$З_{дн.}$	$T_p$	$З_{осн}$
Руководитель	ППС 4	1	36800	0,3	0,2	1,3	71760	2162	15	32500
Студент	ППС 1	1	9893	0,3	0,2	1,3	19291	529	49	26000
Итого:										58500

#### 4.3.4 Страховые отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления в этой статье производят согласно нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования.

Отчисления считаются следующим образом:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot З_{осн}, (11)$$

где  $k_{внеб}$ - коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Таблица 7 – Отчисления во внебюджетные фонды каждого исполнителя работы

Исполнитель	Основная зарплата, руб.	$З_{внеб}$ , руб.
Руководитель	32 430	8 789
Студент	25 921	7025
Итого:		15 800

#### 4.3.5 Накладные расходы

В этой статье учитываются все затраты, не вошедшие в предыдущие статьи расходов. Определим величину накладных расходов по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}}, (12)$$

где  $k_{\text{нр}}$  - коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$З_{\text{накл}} = 19\,796 \cdot 0,16 = 6500 \text{ руб.}$$

#### 4.3.6. Формирование бюджета затрат научно- исследовательского проекта

Все расчеты, произведенные в предыдущих статьях, являются основой для формирования бюджета научно- исследовательского проекта. Определение бюджета затрат на НТИ по каждой статье приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Смета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	4 800	
2. Амортизация на специальное оборудование	1 000	
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	58 900	Суммарная величина обоих исполнителей
4. Отчисления во внебюджетные фонды	15 800	Суммарная величина обоих исполнителей
5. Накладные расходы	15 500	
6. Смета затрат НТИ	99 000	

#### 4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Расчет интегрального показателя эффективности определяет искомую эффективность. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$  - интегральный финансовый показатель разработки;

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

$\Phi_{\text{max}}$  - максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Так как в данной работе рассматривается только один вариант исполнения, то эффективность можно найти следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  - интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

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

$b_i$  - балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

В таблице 9 отображена сравнительная оценка вариантов исполнения проекта.

Таблица 9 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исполнение 1
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5

3. Помехоустойчивость	0,15	4
4. Энергосбережение	0,2	4
5. Надежность	0,25	4
6. Материалоемкость	0,15	5
ИТОГО:	1	

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,3$$

По пятибалльной шкале значение показателя, соответствующего данной разработке, можно отнести к хорошему значению ресурсоэффективности, то есть, в целом, и эффективность разработки тоже на высоком уровне.

### **Вывод по разделу**

В разделе «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» данной бакалаврской работы был произведен анализ потенциальных потребителей разработки, выполнено планирование исследовательских работ и бюджета НИИ, определена эффективность научно-технического исследования.

Планирование исследовательских работ показало, что для выполнения всего исследования необходимо затратить 45 дней. Следовательно, работа может быть выполнена за 3 месяца. Наиболее продолжительный этап – составление отчета о работе.

Бюджет данного исследования составил 99000 рублей. Основные затраты составляет заработная плата.

Метод исследования относительно прост и экономичен. Исследование ресурсоэффективно, экономически целесообразно.