

Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.03.02 Физика  
 ООП/ОПОП Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
<i>Исследование рамановских спектров углеродных нановолокон при высоком давлении и лазерном нагреве</i>

УДК 661.666-022.532:539.184:62-987

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Ню Сяю		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Лаптев Р.С.	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Никитина Л.В.			

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Сечин А.И.	Д.Т.Н., профессор		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
<b>УК(У)-9</b>	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способен применять естественно-научные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
<b>ОПК(У)-2</b>	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
<b>ОПК(У)-3</b>	Способен использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.
<b>ОПК(У)-4</b>	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-5</b>	Способен использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.

<b>ОПК(У)-6</b>	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
<b>ОПК(У)-7</b>	Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
<b>ОПК(У)-8</b>	Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
<b>ОПК(У)-9</b>	Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
<b>ПК(У)-2</b>	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта
<b>ПК(У)-3</b>	Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
<b>ПК(У)-4</b>	Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
<b>ПК(У)-5</b>	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований
<b>ПК(У)-6</b>	Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
<b>ПК(У)-7</b>	Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме
<b>ПК(У)-8</b>	Способность понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования

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

Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

\_\_\_\_\_ Лидер А.М.

(Подпись) (Дата)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
150Б91	Ню Сяю

Тема работы:

<i>Исследование рамановских спектров углеродных нановолокон при высоком давлении и лазерном нагреве</i>	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	22.05.2023, 142 - 41/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	06.06.2023
--	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Углеродные нановолокна диаметром 50-200 нм и длиной 1-15 мкм фирмы Sanfeng Nano.          гидростатическое давление, создаваемое алмазной наковальней, внешний нагрев на устройстве алмазной наковальней с нагревательным кольцом, лазерный нагрев, одноступенчатый спектрометр комбинационного рассеяния inVia Reflex фирмы Renishaw plc (Великобритания) с Ar<sup>+</sup>/Kr<sup>+</sup> лазером (514,5 нм, E = 2,41 эВ)</p>
<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>  <i>(аналитический обзор литературных источников 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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения особенностей структуры углеродных нановолокон при высоком давлении и температуре.</li> <li>- Подготовка экспериментальных образцов и методы исследования их характеристик.</li> <li>- Результаты исследований на рамановском спектрометре при варьировании давлений и температур.</li> <li>- Социальная ответственность.</li> <li>- Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> </ul>

	- Заключение
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Социальная ответственность	Сечин А.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
-	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	3.10.2022
---	-----------

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Никитина Л. В.			

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Ню Сяю		



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

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика

Уровень образования бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
150Б91	Ню Сыяо

Тема работы:

*Исследование рамановских спектров углеродных нановолокон при высоком давлении и лазерном нагреве*

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	06.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.11.2022	Литературный обзор по теме ВКР	15
06.02.2023	Исследование рамановских спектров углеродных нановолокон при высоком давлении	20
28.04.2023	Исследование рамановских спектров углеродных нановолокон после лазерного нагрева при различных давлениях	20
2.05.2023	Анализ результатов	20
15.05.2023	Социальная ответственность	10
20.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
29.05.2023	Заключение	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Лаптев Р.С.	К.Т.Н.		

**Консультант (при наличии)**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Никитина Л. В.			

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП/ОПОП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		
---	------------	----------------------	--	--

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Ню Сяю		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 95 с., 26 рис., 16 табл., 39 источников.

Ключевые слова: углеродные нановолокна, высокое давление, высокая температура, лазерный нагрев, ячейка с алмазными наковальнями, спектроскопия комбинационного рассеяния, рамановская спектроскопия.

Объектом исследования являются углеродные нановолокна диаметром 50–200 нм и длиной 1–15 мкм фирмы Sanfeng Nano.

Целью работы является исследование изменения структуры углеродных нановолокон при высоком давлении и температуре методом рамановской спектроскопии.

В процессе исследования проводилось прессование образцов в ячейке с алмазными наковальнями для создания сверхвысоких давлений. Проводились исследования структуры углеродных нановолокон после приложения давления и нагрева лазером по микрофотографиям просвечивающей микроскопии, а также спектрам рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния в процессе декомпрессии.

В результате исследований установлено, что в углеродных нановолокнах не происходит структурная трансформация при давлении 36,7 ГПа.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: диапазон давлений, создаваемых в ячейке с алмазными наковальнями, 0,9–25 ГПа, лазерный нагрев выше 1000°C.

Область применения: результаты работы могут быть использованы для разработки методов синтеза новых материалов на основе углеродных нановолокон с целью внедрения в производство, для расширения фундаментальных знаний в области трансформации структуры углеродных нановолокон при высоких давлениях и температуре.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании высокопрочных материалов на основе углеродных нановолокон, эксплуатируемых в экстремальных условиях, возможном



модифицировании известных видов углеродных материалов с целью появления новых свойств, проявляющихся в условиях высоких давлений и температур, а также расширении знаний в области поведения углеродных материалов при экстремальных условиях, что, несомненно, приведет к увеличению числа сфер возможного применения нановолокон.

В будущем планируется проведение спектроскопических исследований при высоком давлении в целях модифицирования углеродного волокна.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	13
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА.....	15
1.1 Введение в углеродные материалы.....	15
1.2 Состояние исследований материалов из углеродного волокна .....	17
1.2.1 Рамановская спектроскопия материалов из углеродного волокна .....	21
1.2.2 Состояние исследований углеродных материалов под высоким давлением.....	22
1.2.3 Состояние исследований углеродных волокнистых материалов при высоких температурах и давлении.....	24
1.3 Значимость исследования данной темы .....	28
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	29
2.1 Введение в технологию высокого давления.....	29
2.1.1 Развитие техники высокого давления.....	29
2.1.2 Внедрение высоковольтного устройства и экспериментальные этапы	30
2.2 Калибровка давления .....	32
2.3 Методы определения характеристик техники высокого давления.....	33
2.3.1 Процесс разработки рамановской спектроскопии.....	33
2.3.2. Устройство и принцип работы рамановского спектрометра .....	34
2.4 Применение рамановской спектроскопии в области исследований углеродного волокна .....	35
2.5 Технология лазерного нагрева.....	36
ГЛАВА 3 ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	39

3.1 Введение.....	39
3.2 Характеристика углеродных нановолокон при атмосферном давлении....	39
3.3 Характеристика рамановской спектроскопии углеродных нановолокон при высоком давлении <i>in situ</i> .....	40
3.4 Эксперимент по нагреву углеродного нановолоконного лазера .....	45
3.5 Электронная микроскопия углеродных нановолокон.....	48
ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	56
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	56
4.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	57
4.2.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	57
4.2.2 SWOT – анализ .....	59
4.3 Планирование научно-технического исследования .....	61
4.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ .....	63
4.4 Бюджет научного исследования .....	68
4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	68
4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ .....	68
4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	69
4.4.4 Дополнительная заработная плата .....	71
4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды .....	71
4.4.6 Расчет затрат на электроэнергию .....	71
4.4.7 Формирование бюджета затрат НТИ .....	72
4.5 Ресурсоэффективность .....	72

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» .....	75
ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	78
Введение.....	78
5.1 Производственная безопасность.....	78
5.1.1 Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте .....	78
5.1.2 Электромагнитное излучение .....	79
5.1.3 Шум .....	80
5.1.4 Электробезопасность .....	81
5.1.5 Пожарная безопасность.....	83
5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности .....	84
5.3 Охрана окружающей среды .....	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	85
5.5 Перечень законодательного документа .....	87
Вывод по главе .....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ .....	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	92

## ВВЕДЕНИЕ

Углеродное волокно является высокопроизводительным волокном, состоящим из углеродных элементов. Благодаря низкому удельному весу и высокой прочности при одновременном снижении веса, углеродное нановолокно широко используется в промышленности, аэрокосмической области, ветроэнергетике, а также в технологиях хранения водорода. При этом условия эксплуатации обычно сопровождаются высоким давлением и температурой. В настоящее время мало исследований по структурной стабильности углеродного волокна при изменении параметров экстремальных условий, таких как высокое давление и температура. Именно по этой причине в данной работе в качестве экспериментального исходного материала выбрано углеродное нановолокно, исследуемое при высоком давлении и температуре с помощью рамановской спектроскопии.

Рамановская спектроскопия, как один из современных неразрушающих, а также чувствительных методов, позволяет обнаружить и исследовать изменения в структуре и свойствах материала в экстремальных условиях.

Таким образом, целью данной работы является исследование изменения структуры углеродных нановолокон при высоком давлении и температуре методом рамановской спектроскопии. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Ознакомление с современным состоянием исследований структуры и физических свойств углеродного нановолокна по литературным данным;
2. Исследование исходного материала методами рамановской спектроскопии, рентгеновской дифракции, просвечивающей микроскопии;
3. Исследование структуры углеродных нановолокон методом рамановской спектроскопии при высоком давлении с использованием ячейки с алмазными наковальнями;

4. Исследование структуры углеродных нановолокон методом рамановской спектроскопии при высоком давлении и лазерном нагреве с использованием ячейки с алмазными наковальнями;

5. Анализ полученных результатов.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

## 1.1 Введение в углеродные материалы

В последние годы углеродные материалы занимают одну из лидирующих позиций в научно-исследовательском сообществе.

Благодаря электронному расположению на оболочках атома углерод имеет множество форм связи. Во внешней электронной оболочке углерода расположено четыре электрона, которые могут образовывать одинарную углерод-углеродную связь, двойную углерод-углеродную связь, тройную углерод-углеродную связь, что соответствует  $sp$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$  гибридизации. Такое разнообразие типов связей позволяет углероду образовывать множество различных аллотропных модификаций, таких как графен, углеродные нанотрубки, алмаз, углеродное волокно и другие углеродные материалы. Углеродное волокно, обсуждаемое в данной работе, представляет собой разновидность углеродного материала атомы углерода которого находятся преимущественно в  $sp^2$  гибридизированном состоянии. Благодаря разным формам гибридизации углерод обладает разнообразными свойствами, например графитоподобные материалы в основном в форме  $sp^2$ -гибридизации обычно обладают отличной электропроводностью и могут использоваться в качестве проводников, в то время как углеродные материалы, образованные за счет  $sp^3$ -гибридизации, из-за отсутствия внутри свободных электронов, являются хорошими изоляторами.

Когда  $2s$ -орбиталь в атоме углерода гибридизуется с  $2p$ -орбиталью, гибридная орбиталь называется  $sp$ -гибридизацией. Гибридизация  $sp^2$  представляет собой гибридизацию одного  $2s$ -электрона и двух  $2p$ -электронов с образованием  $sp^2$ -орбитали. Гибридизация  $sp^3$  относится к переходу электронов с одной  $2s$ -орбитали на  $2p$ -орбиталь с образованием четырех эквивалентных  $sp^3$ -гибридизированных орбиталей. Углерод в  $sp^3$ -гибридизированном состоянии образует 3 прочных  $\sigma$ -связи с расстоянием 0.1421 нм, средней энергией связи 627

кДж/моль, валентными углами  $120^\circ$ . Остальные 2p-орбитали в той же плоскости перпендикулярны плоскости, где расположены три  $\sigma$  связи, составляют  $\pi$  связи. Электроны, образующие  $\pi$ -связь не локализованы и более свободны в своем перемещении 错误!未找到引用源。 .

В связи с этим углеродное волокно обладает множеством уникальных свойств и характеристик, таких как малый вес, высокая термостойкость, электропроводность и др. Обладая отличными физическими свойствами, химические свойства углеродного волокна также чрезвычайно стабильны, например, в сильной кислоте и сильной щелочи устойчивы к коррозии, стабильное существование в сильной кислоте и щелочи отличается от трубчатой структуры углеродных нанотрубок. Так внутренняя структура углеродного волокна проявляется в виде хаотичной графитовой структуры, а в макроскопическом состоянии в виде волокнистого углеродного материала.

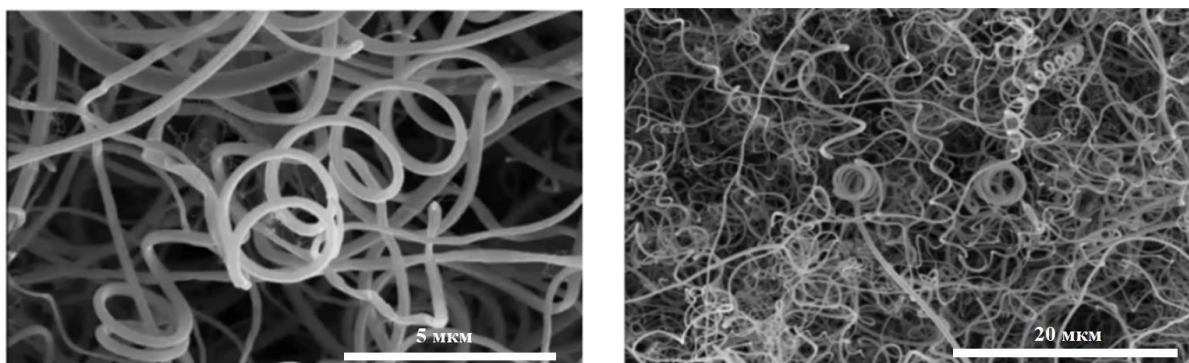


Рисунок 1.1 – Микрофотографии спирального углеродного волокна, полученного дуговым методом (сканирующая электронная микроскопия)

Существует также много различных типов углеродного волокна, по форме углеродное волокно можно разделить на нить, штапельное волокно и рубленое волокно. Нитевидное углеродное волокно может использоваться в промышленных конструкционных деталях и аэрокосмических конструкционных деталях, а коротковолокнистое углеродное волокно в основном используется в строительной отрасли. Такие как короткий углеродный волокна, графит, низкочастотный электромагнитный экранирующий бетон, промышленный войлок из углеродного волокна и т. д. 0 В соответствии с различными свойствами



углеродное волокно также можно разделить на тип общего назначения и высокопроизводительный тип, из которых высокопроизводительный тип, можно разделить на высокопрочный тип, сверхвысокопрочный тип, а также высокую модель и сверхвысокую модель, из которых прочность углеродного волокна общего назначения составляет 1000 МПа, а модуль упругости составляет около 10 ГПа. Прочность высокопрочного типа высокопроизводительного типа может достигать 2000 МПа с модулем 250 ГПа, а прочность сверхвысокопрочного типа может превышать 4000 МПа. Модуль упругости высокой модели может достигать 300 ГПа, в то время как модуль сверхвысокой модели может достигать 450 ГПа. В последние годы ученые продолжают вводить новшества и создавать, углеродное волокно произвело новый тип высокопрочного углеродного волокна с высоким удлинением, удлинение этого типа углеродного волокна может достигать 2. Благодаря осевому модулю материала углеродного волокна и высокой прочности, отсутствию ползучести и хорошей усталостной прочности. В то же время, поскольку углеродное волокно состоит из углеродных элементов, проводимость желаемого материала из углеродного волокна находится между металлом и неметаллом. В то же время он обладает такими характеристиками, как малый коэффициент теплового расширения, хорошая коррозионная стойкость и низкая плотность волокон [0<sup>[2]</sup>]. В то же время из-за природы углеродного волокна углеродное волокно необходимо защищать от легкого хранения.

## **1.2 Состояние исследований материалов из углеродного волокна**

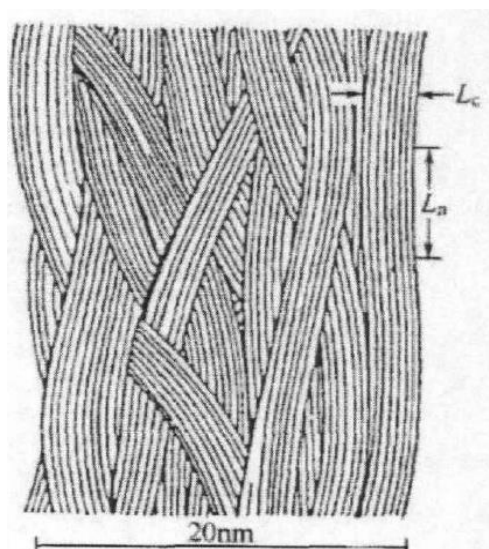
В настоящее время не проводилось никаких исследований по изучению углеродного волокна при высокой температуре и давлении, но было построено множество теоретических моделей структуры углеродного волокна для установления взаимосвязи между структурой углеродного волокна и его характеристиками. Модель структуры полосы, модель микрофибриллярной структуры, модель структуры кожного сердечника, модель трехмерной структуры.

Perret и Raland 错误!未找到引用源。 зонную модель, изучая углеродные волокна на основе полимеров с использованием рентгеновского дифрактометра и просвечивающего электронного микроскопа. Модель полосы проиллюстрирована ниже.



Рисунок 1.2 – Модель полосы

Токарский и Дифендор 错误!未找到引用源。 предложили модель структуры микроволокна, основываясь на микрофотографиях высокомодульных углеродных волокон, полученных с помощью просвечивающей микроскопии (ПЭМ).



### Рисунок 1.3 – Модель структуры микроволокна

Беннетт и Джонсон ~~错误!未找到引用源。~~ исследовали углеродные волокна с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (ПЭМВР).

Модель структуры кожного сердечника, предложенная Ча, показана на рисунке ниже.

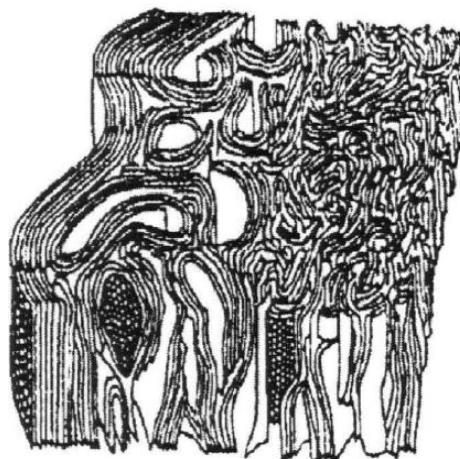


Рисунок 1.4 – Модель углеродного волокна, по типу кожного сердечника

Трехмерная структурная модель углеродного волокна предложена Барнеттом и Норром, после наблюдения кислородной плазмы при травлении углеродного волокна с помощью электронной микроскопии.

Морфология представляет собой трехмерную модель гетерогенной структуры угольных полимеров с сердечником, как показано на рисунке 1.5. Данная структурная модель волокна состоит из ядра (1); промежуточного слоя с радиальной ориентацией (2), оболочки (3); области с большой концентрацией напряжений (4); трещинами (5); ламелярных оболочек на включениях и полостях (6); больших полостей; основной структуры (8); жаростойких включений (9); мелкокристаллической структуры (10) и пор (11).

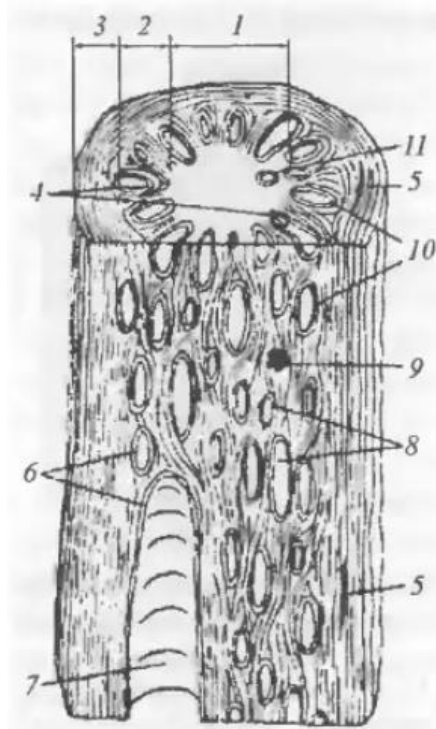


Рисунок 1.5 – Трехмерная структурная модель

В тоже время, поскольку углеродное волокно является разновидностью графитового углеродного материала, углеродной шестикольцевой структурой, такие структурные характеристики приводят к определенной скрученной хаотической структуре внутри углеродного волокна, поэтому Фракллин<sup>[4]</sup> сначала предположил, что в такой сложной многослойной структуре внутри углеродного волокна все еще существуют некоторые напряжения, и когда образец помещается в поле напряжений или высокотемпературную среду, это может привести к тому, что углеродное волокно будет достаточно нестабильным [3].

В. Арнер<sup>[5]</sup> решетке графена. Было установлено, что поле напряжений концентрируется в центре дислокации и ослабевает от центра к внешнему краю.

Таким образом, предполагается, что углеродные волокна, которые также являются кристаллами графита, могут иметь одинаковые остаточные напряжения, и с учетом этих особенностей в данной работе используется спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия) для

эффективной характеристики внутреннего отклика углеродных волокон при высоком давлении и температуре.

### 1.2.1 Рамановская спектроскопия материалов из углеродного волокна

Углеродные нановолокна, как углеродные материалы, образованные атомами углерода в форме  $sp^2$  гибридизации, привлекли широкое внимание исследователей. Хе Фу [6] и другие использовали рамановскую спектроскопию для изучения внутренней структуры материалов из углеродных нановолокон. Они обнаружили, что монокристаллический графит обычно может наблюдать полосу только на уровне  $1580 \text{ см}^{-1}$ , а для поликристаллических углеродных волокон его также можно наблюдать на уровне  $1355 \text{ см}^{-1}$ . Еще одна полоса наблюдалась вблизи для дальнейшего анализа причин ее образования, и по космической группе углеродных волокон следовала формула графитовой пространственной группы, а именно:

$$\Gamma = 2 E_{2g}(R) + E_{1u}(IR) + 2B_{2g} + A_{2u}(IR) \quad (1)$$

В графитовой пространственной группе существует шесть колебательных мод, из которых  $2E_{2g}$  — рамановская вибрация углеродного волокна. Рамановскую вибрацию можно разделить на два режима:  $E_{2g1}$  и  $E_{2g2}$ . Два разных режима вибрационных пиков представляют собой разные микроскопические механизмы, потому что графитоподобный углеродный материал представляет собой гексагональную кристаллическую систему, и материал имеет как взаимодействие соседних атомов углерода в плоскости, так и взаимодействие атомов углерода между слоями.  $E_{2g1}$  — это вибрация, вызванная взаимными колебаниями между соседними плоскостями, и соответствующая ей частота в спектре комбинационного рассеяния света составляет  $47 \text{ см}^{-1}$ . Поскольку силы между слоями в графитовых материалах малы и незаметны, интенсивность при рамановской спектроскопии мала и ее почти трудно измерить.  $E_{2g2}$  относится к рамановской вибрации, вызванной взаимной вибрацией соседних атомов углерода в одной плоскости углеродных материалов, то есть вызванной вибрацией расширения и сжатия двойных связей углерод-углерод между

соседними атомами углерода Рамановская вибрация указывает на то, что в углеродном материале преобладает гибридизация  $sp^2$ , и ее соответствующее положение в рамановской спектроскопии составляет  $1585\text{ см}^{-1}$ .  $E_{2g2}$  также известен как пик G. Существует также характерный пик в графитоподобных материалах, пик D. Появление D пика обусловлено низкой степенью графитизации материала, низкой ориентацией, наличием микрокристаллов графита и множеством структурных дефектов, в основном вызванных вибрацией  $sp^2$  гибридных связей на границе или другими дефектами 错误!未找到引用源。 Пик D соответствует положению  $1358\text{ см}^{-1}$  в спектре комбинационного рассеяния. В общем, в соответствии с интенсивностью пика D можно объяснить степень беспорядка внутри углеродного материала. Поэтому, как правило, монокристаллический графит имеет только G-моду, но не D-моду [6]

### **1.2.2 Состояние исследований углеродных материалов под высоким давлением**

Углеродные материалы в природе в основном существуют с  $sp^2$  гибридизацией и относительно мало углеродных материалов с гибридизацией  $sp^3$ . Как экстремальное физическое состояние, высокое давление может эффективно изменять расстояние между атомами или молекулами в материале, регулировать их взаимодействие и даже образовывать связи. Например, еще в середине прошлого века Банди и др. обнаружили, что использование графита в качестве исходника можно синтезировать алмаз с помощью высокой температуры и высокого давления. В дальнейшем большое количество экспериментальных исследований при высоких температурах и высоком давлении еще больше углубило понимание фазового перехода от графита к алмазу и установило фазовую диаграмму графита при высокой температуре и высоком давлении, которая используется и по сей день. Стекловидный углерод используется в качестве типичного 100% гибридного аморфного углеродного материала в  $sp^2$  гибридном состоянии. В 2011 году Лин и др. впервые использовали неупругое рентгеновское комбинационное рассеяние света для изучения изменения режима

связывания стекло-углерод при комнатной температуре и высоком давлении, и экспериментальные результаты показали, что в К-краевом спектре углерода при высоком давлении характерные пики  $\pi^*$  увеличиваются с увеличением давления. При давлении 44,4 ГПа  $\pi^*$  характерный пик полностью исчез, что указывает на то, что  $sp^2$  углерод в стеклянном углероде был полностью преобразован в  $sp^3$  гибридную форма. Дальнейшие данные рентгеновской дифракции при высоком давлении *in situ* показали, что стеклоуглерод всегда сохраняет аморфную структуру при высоком давлении, поэтому Лин и др. назвали его «аморфным алмазом». Что касается фуллеренов, углеродных нанотрубок и других углеродных аллотропов, исследователи провели исследования условий высокой температуры и высокого давления. В настоящее время исследования, связанные с углеродным нановолокном, все еще редко участвуют.

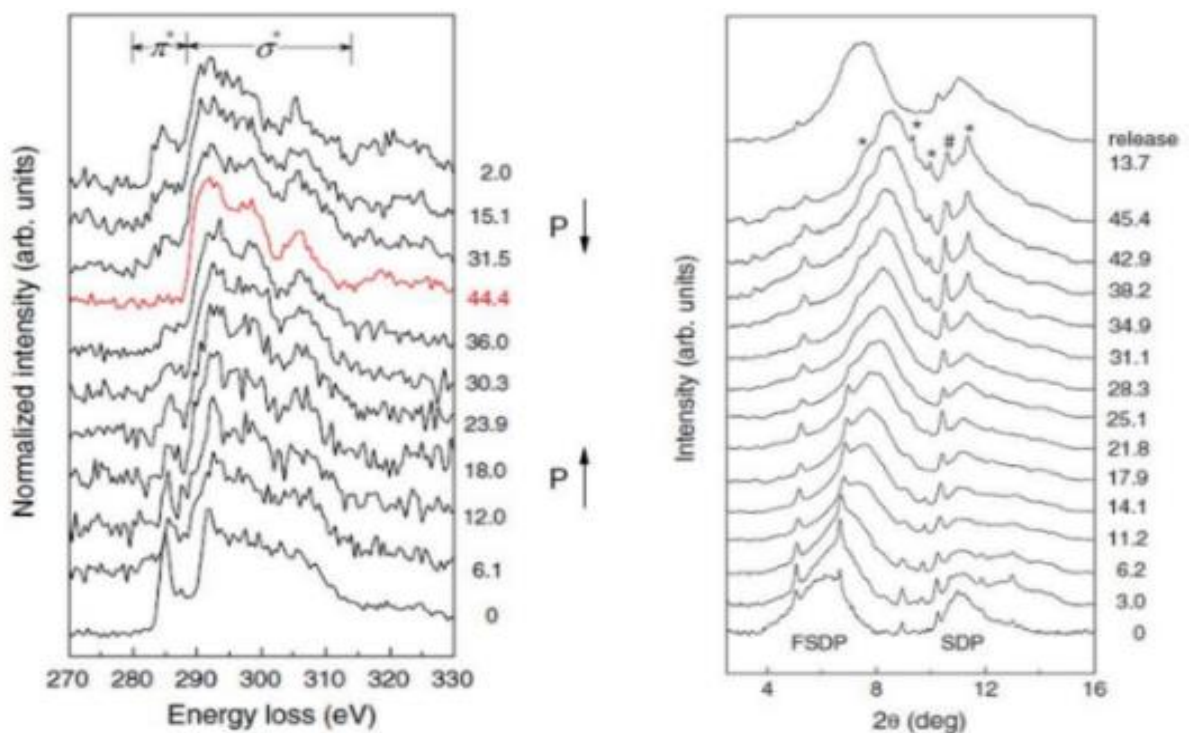


Рисунок 1.2 – Неупругость стеклоуглерода при высоком давлении.

Рентгеновское комбинационное рассеяние света (слева) при высоком давлении и дифракция рентгеновских лучей *in situ* (справа)

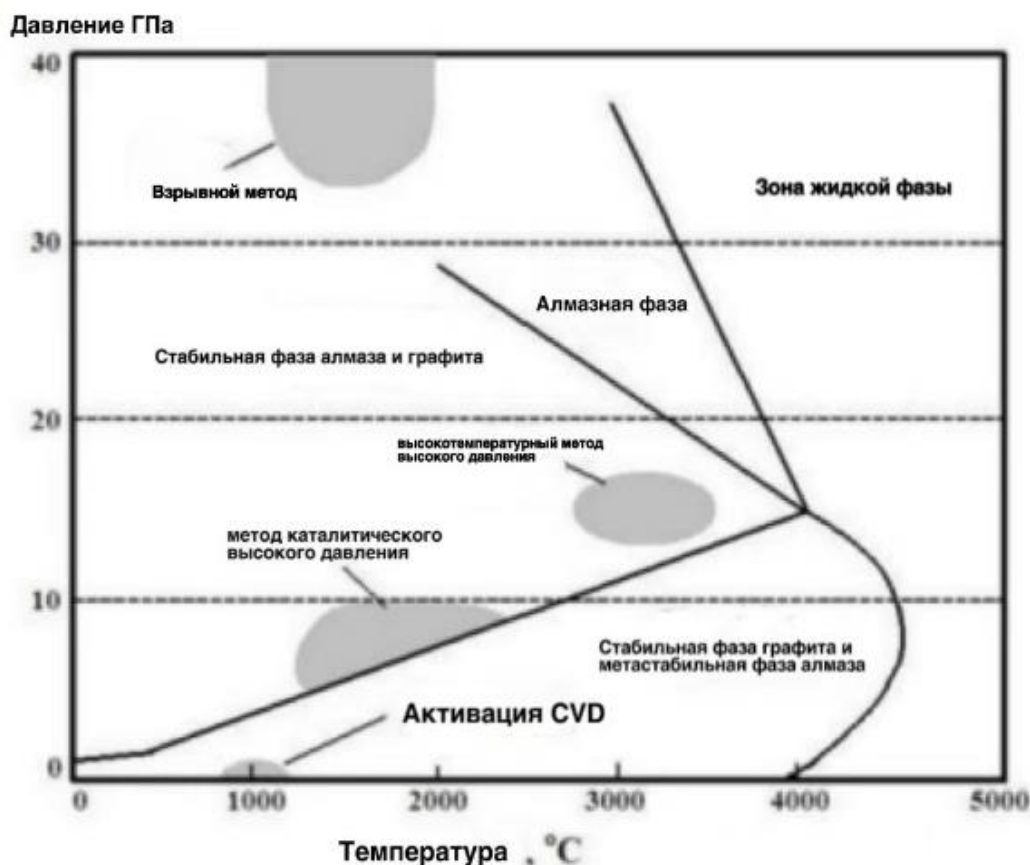


Рисунок 1.3 – Высокотемпературный и высокотемпературный фазовый переход графита

### 1.2.3 Состояние исследований углеродных волокнистых материалов при высоких температурах и давлении

Согласно литературным данным по углеродным нановолокнам при высокой температуре и высоком давлении, можно видеть, что К. Папагелис ~~错误! 未找到引用源。~~ и другие измерили и проанализировали спектры комбинационного рассеяния света при высоком давлении углеродных волокон со структурой сложенных друг на друга чашках. Установлено, что спектры комбинационного рассеяния света других типов углеродных нановолокон и графитовых материалов не отличались при различных значениях давления. Было обнаружено, что происходит значительное увеличение пикового сигнала углеродного волокна при постоянном давлении (около  $1332\text{ см}^{-1}$  при комнатной температуре и нормальном давлении) до значения  $1400\text{ см}^{-1}$ . Пик G углеродного волокна также движется в направлении более высокой частоты со скоростью 4,2



$\text{cm}^{-1} \text{ ГПа}^{-1}$  с увеличением давления. В тех же условиях под давлением скорость движения графита составляет  $4,7 \text{ cm}^{-1} \text{ ГПа}^{-1}$ , скорость движения многостенных углеродных нанотрубок –  $3,8 \text{ cm}^{-1} \text{ ГПа}^{-1}$ .

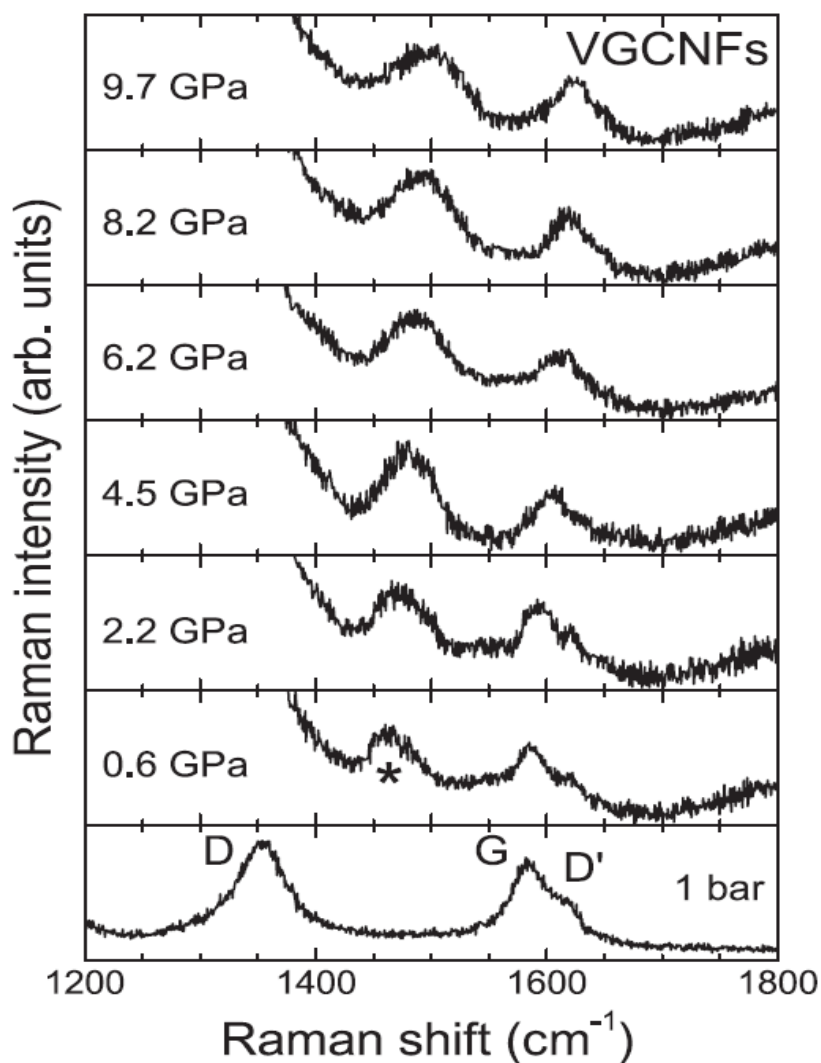


Рисунок 1.4 – Спектры комбинационного рассеяния 4 уложенных чашеобразных углеродных нановолокон при различных давлениях

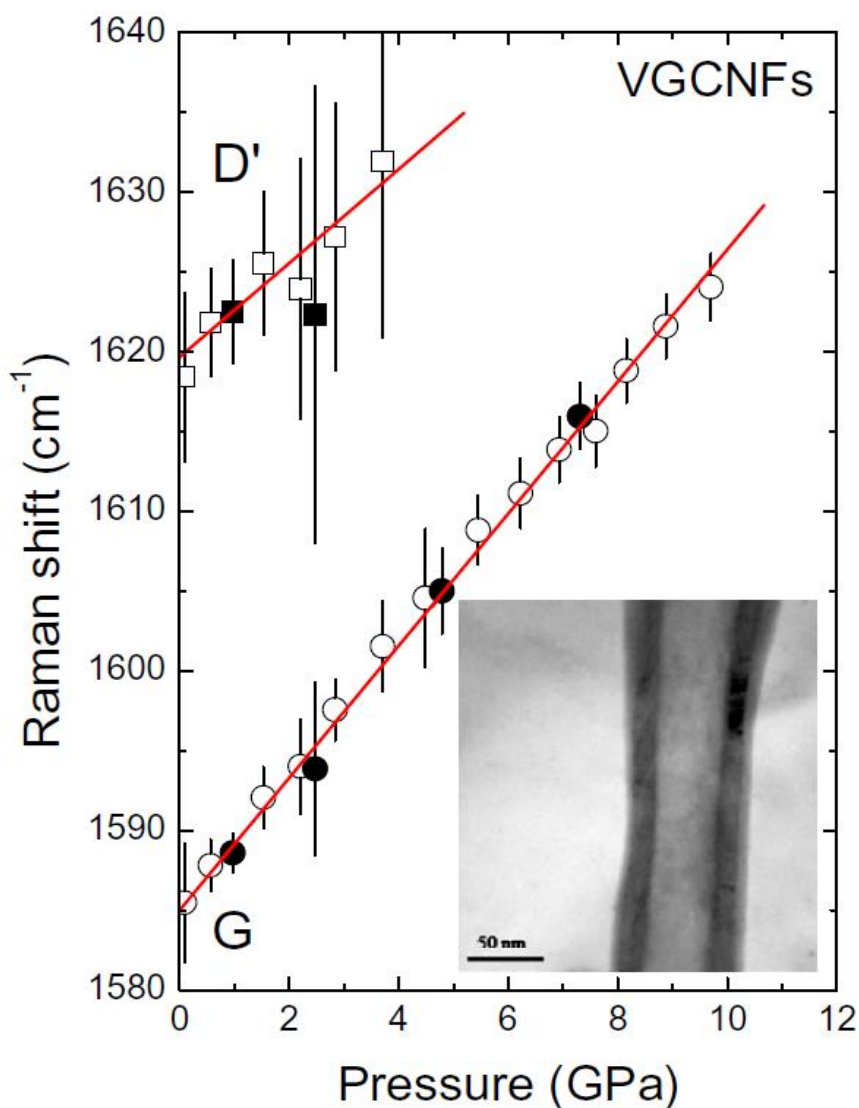


Рисунок 1.5 – Изменение частоты G и D рамановских пиков чашеобразных углеродных нановолокон под давлением.

Мэланит 错误!未找到引用源。 и др. провели серию исследований композиционных компрессионных свойств углеродных волокон и провели эксперименты с лазерным комбинационным рассеянием света на материалах из углеродного волокна на основе полимеров. Результаты показывают, что модуль осевого волокна уменьшается со сжатием деформации.

А в ходе эксперимента также была обнаружена оптимальная температура графитизации. Эта температура эффективна для каждого предшественника углеродного волокна. При более низких температурах графитизации и контроля

модуля упругости за счет контроля растяжения прекурсора можно получить углеродное волокно с отличными компрессионными свойствами.

Для углубления знаний в области структурной трансформации углеродных нановолокон требуется проводить исследование спектральных изменений комбинационного рассеяния не только при комнатной температуре, но в условиях высоких температур. Результаты показывают, что G-пик и D-пик в рамановском спектре углеродного волокна имеют разную степень отношения интенсивности в условиях высоких температур, поскольку остаточное напряжение внутри углеродных нановолокон, вызванное нагревом, высвобождается. Это исследование может показать, что при высоких температурах внутри материала углеродного нановолокна будет происходить снятие напряжения, и в этом процессе слой графитового листа будет удлиняться и расслаиваться, и материал будет постепенно разрушаться и трансформироваться в упорядоченную структуру 错误!未找到引用源。

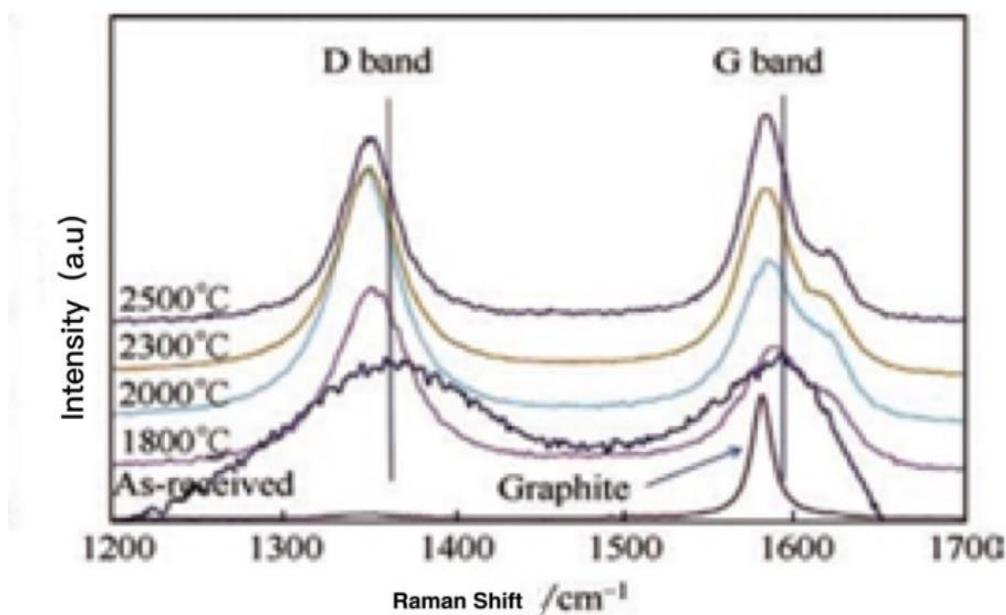


Рисунок 1.6 – Рамановская спектроскопия исследования различных температурных полей

### 1.3 Значимость исследования данной темы

Несмотря на то, что в настоящее время современные исследователи достаточно отчетливо понимают свойства и структуру углеродных волокон, а также существует большое число работ, в которых применяли рамановскую спектроскопию для уточнения структуры углеродных волокон при комнатной температуре и давлении и для анализа ряда свойств, таких как микроскопическое напряжение, кристаллическая структура, графитизация и структурная неоднородность [3] однако, в экстремальных условиях высокой температуры и высокого давления природа исследований углеродного волокна не изучалась. Согласно известным в настоящее время исследованиям, было обнаружено, что теоретическая прочность углеродного волокна может достигать 184 ГПа, но значение прочности материала углеродного волокна с самой высокой известной прочностью в мире составляет менее одной десятой от теоретической прочности [[3] Поэтому исследование углеродного волокна при высокой температуре и высоком давлении очень необходимо и до сих пор имеет далеко идущее значение.

Данная работа посвящена исследованию структурных трансформаций углеродных нановолокон, возникающих при высоком давлении и температуре и регистрируемых по изменениям в спектрах комбинационного рассеяния. Эксперименты позволят в дальнейшем оценить улучшение или ухудшение свойств углеродных нановолокон после воздействия высокими давлениями и температурой, а также даст возможность заполнить недостающие пробелы в области физики углеродных материалов. Исследование, несомненно, окажется полезным для аэрокосмической, строительной, спортивной, и других областях применения, при этом снизив затраты во многих сферах и даже увеличив срок службы изделий из углеродного волокна.

## ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Введение в технологию высокого давления

#### 2.1.1 Развитие техники высокого давления

Свойства вещества зависят от расположения молекул или атомов внутри вещества. Методы высокого давления направлены на изменение внутренней молекулярной или атомной структуры вещества путем увеличения давления для сокращения расстояния между молекулами или атомами в материале. Это влияет на макроструктуру всего вещества и даже на физико-химические свойства материала. По сравнению с другими областями исследований в физике, технология высокого давления была открыта ученым относительно поздно 错误!未找到引用源。 Обнаружив, что температура и химический состав могут изменять внутреннюю структуру материи, ученые, наконец, пришли сюда В 20-м веке стало понятно, что высокое давление также может быть средством планирования изменений в структуре и свойствах молекул или атомов внутри материи. Поэтому с тех пор ученые пытаются покорить высоковольтную технику, но, к сожалению, из-за относительно низкого уровня технологий в то время и отсталого общественного развития они не могут обеспечить большую теоретическую и техническую поддержку высоковольтной техники. Поэтому уровень, которого могла достичь технология высокого давления в то время, был ограничен. Наконец, в конце XX века Эндрюс открыл критическое явление газа в экспериментальных исследованиях высокого давления 错误!未找到引用源。 Амагат также внесли важный вклад в изучение физики высоких давлений. Калетт измерил степень сжатия жидкостей, сконструировал насос, способный достигать почти 100 миллионов давлений, а Амагат разработал очень известный свободный поршневой стол 错误!未找到引用源。 непрерывным развитием общества и непрерывными исследованиями технология высокого давления постепенно внедряется в производство и быденную жизнь. Сегодня синтез многих неорганических веществ и сверхтвердых материалов неотделим от технологии высокого

давления, и эта ситуация также заставляет технологию высокого давления продолжать развиваться. Существует множество способов получения условий высокого давления, таких как: пневматический пресс, нагрев, ударная волна и т. д.

### **2.1.2 Внедрение высоковольтного устройства и экспериментальные этапы**

В этом эксперименте пресс используется для достижения условий высокого давления, необходимых для изменения структуры материалов из углеродного волокна.



Рисунок 2.1 – Внешний вид основных составляющих прессы с алмазными наковальнями

Как показано на рисунке 2.1 пресс с парной структурой наковальней, называемой ячейкой с алмазными наковальнями или DAC (Diamond anvil cell), состоит из алмазов, герметизирующей прокладки с отверстиями, нажимных винтов, шестигранных ключей.

В 1950 году ученый Лоусон сконструировал первый пресс, основанный на принципе конструкции верхней наковальни. Мао и Белл и др. усовершенствовали устройство наковальни с алмазным наконечником и

разработали пресс типа Мао-Белла [10].~~错误!未找到引用源。~~ Пресс с верхней наковальной позволяет легко достигать высоких уровней давления. Из рисунка, видно, что пресс с верхней конструкцией наковальни имеет небольшую форму и вес, что удобно для переноски и эксплуатации исследователями. Чтобы исследуемый материал достигал условий высокого давления необходимо выполнить следующие действия:

1. Отрегулируйте поле зрения микроскопа так, чтобы плоскость алмаза находилась точно в центре поля зрения, через настроенный микроскоп, чтобы наблюдать, находится ли алмаз в чистом состоянии. Если на алмазе наблюдается пыль, необходимо протереть алмаз, чтобы удалить ее, чтобы избежать влияния на точность калиброванного значения давления, а также предотвратить повреждение вещества на алмазе при прессовке.

2. Произведите пробивку отверстия, с помощью инструмента для пробивания прямоугольного листа. Пробивка осуществляется под постоянным контролем диаметра круглого отверстия, а также соответствия диапазону давлений, которых может достичь пресс. Например, для листа толщиной 300 мкм диапазон давлений, достигаемый соответствующим прессом, составляет 0-70 ГПа, толщиной 400 мкм – 0-40 ГПа, для листов толщиной 500 мкм диапазон давлений от 0 до 20 ГПа. В данной работе углеродное волокно находится под давлением 30 ГПа, поэтому был использован лист толщиной 400 мкм.

3. Загрузите образец. С помощью микроскопа, хорошо перфорированную пленку загружают в пресс, оставляя полость образца в прессе. Образец углеродного волокна помещают в камеру образца, а также рубины, необходимые для последующего контроля постоянного давления.

4. Используйте винты, чтобы герметизировать пресс. После герметизации прессы винтами необходимо непрерывно затягивать винты гаечными ключами для повышения давления.

## 2.2 Калибровка давления

Для повышения давления винты постоянно подкручивают с помощью гаечного ключа. В процессе повышения давления необходимо непрерывно измерять давление в полости, чтобы определить значение давления, достигаемое материалом в прессе в это время. Постоянное давление может быть достигнуто двумя способами, первый из которых – первичное постоянное давление. Первичное постоянное давление означает, что путем измерения физической величины, связанной с давлением, можно вывести значение давления измеряя соответствующую физическую величину. Второй метод – это вторичный метод постоянного давления, что означает, что взаимосвязь между давлением и физической величиной, подлежащей измерению, неизвестна, а взаимосвязь между калибровочным давлением и физической величиной, подлежащей измерению, определяется экспериментально. Таким образом, первичный метод постоянного давления является относительно точным. В начале компрессии значение давления невелико, и именно тогда рубин играет важную роль в калибровке давления. Под микроскопом наблюдают за положением рубина, затем измеряют спектр флуоресценции. В полученном спектре наблюдают значение абсциссы, соответствующее пику флуоресценции рубина при давлении, затем сравнивают со значением абсциссы, соответствующим пику спектра флуоресценции рубина, измеренному без давления, и вычисляют значение давления, преобразованное по формуле. Как правило, рубиновая флуоресцентная спектрометрия может калибровать значения давления в пределах 100 ГПа. Однако, поскольку материал из углеродного волокна, используемый в этом эксперименте, по структуре напоминает вату (или хлопок), он будет продолжать деформироваться и диффундировать в процессе компрессии. При определенном значении давления это приведет к тому, что хлопкоподобный образец заблокирует вид рубинов, наблюдаемых в микроскопе. В этот момент трудно наблюдать за положением рубина через микроскоп. Можно использовать другой метод калибровки давления – постоянное давление алмаза, потому что алмаз удерживался в центральном положении во время



предыдущей загрузки пленки и образца. В этот момент необходимо только отрегулировать поле зрения по центру, найти характеристическое значение и использовать формулу для его преобразования, а также откалибровать значение давления в это время

## **2.3 Методы определения характеристик техники высокого давления**

### **2.3.1 Процесс разработки рамановской спектроскопии**

В 1928 году индийский ученый Ч. В. Раман использовал монохроматический свет ртутной лампы для облучения жидкости  $\text{CCl}_4$ . Было обнаружено изменение в длине волны нового спектра облученного образца  $\text{CCl}_4$ . Поэтому рамановская спектроскопия называется также явлением комбинационного рассеяния. Позже советские ученые обнаружили, что это явление существует не только в жидкостях, но и в кристаллах. Рамановская спектроскопия широко использовалась с 1928 по 1940 год, что позволило ученым использовать частоту, интенсивность и поляризацию рамановской спектроскопии. Рамановская спектроскопия может анализировать изменения молекулярной структуры и свойств. Однако с 1940 по 1960 год рамановская спектроскопия больше не использовалась учеными так широко из-за развития в области инфракрасных технологий. Основная причина заключается в том, что рамановская спектроскопия предъявляет строгие требования к самому образцу и среде использования, требуя достаточного количества образцов и относительно чистой среды без внешних условий, таких как свет. Но после 1960 года, с развитием лазерных технологий, рамановская спектроскопия вернулась в поле зрения общественности. Благодаря своим преимуществам лазер стал идеальным источником света для рамановской спектроскопии. В то же время, с непрерывным развитием технологий, требования к образцам рамановской спектроскопии постепенно снижаются. До сих пор рамановская спектроскопия широко используется в различных отраслях промышленности.

### 2.3.2. Устройство и принцип работы рамановского спектрометра

Рамановская спектроскопия – это разновидность спектроскопии, основанная на анализе вращательных и колебательных состояний молекул, характеризующих внутреннюю молекулярную и кристаллическую структуру образцов.

Рамановский спектрометр состоит из источника света, внешнего светового пути, дисперсионной системы, приемной системы, системы обработки и отображения информации. Изображение рамановского спектрометра, использованного в данной работе, показано на рисунке 2.2.

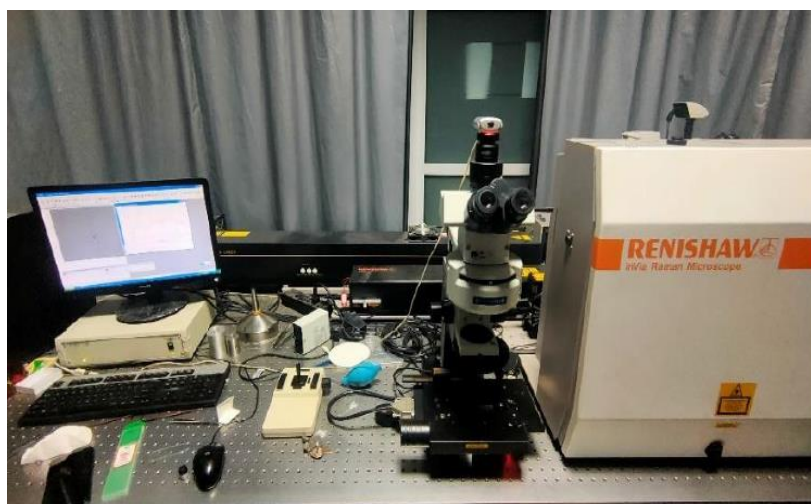


Рисунок 2.2 – Рамановский спектрометр

Принцип работы рамановского спектрометра связан с молекулярным движением. Молекулярное движение состоит из поступательного перемещения, вибраций и вращения молекул. Полная энергия молекул транслируется кинетической энергией, энергией вращения, вибрации, энергией движения электронов. Поскольку поступательная энергия не является квантованной, то энергия движения молекул является суммой трех других энергий. Рамановский спектрометр может характеризовать состояние движения внутри молекулы, потому что при облучении образца фотонами молекулы внутри образца приобретают разные уровни энергии электронов. Уровень энергии электронов будет совпадать с уровнем энергии вибрации, в свою очередь уровень энергии

вибрации имеет соответствующий уровень энергии транспозиции. Воздействие фотонов на молекулу приведет к переходу внутренних молекул, образуя спектр молекулярного поглощения, электроны внутри молекулы также будут соответственно переходить с уровня на уровень. Уровень энергии внутренней вибрации и уровень энергии вращения также меняются, что приводит к спектру уровней энергии вращательных степеней свободы.

Спектр, полученный с помощью рамановской спектроскопии, является вибрационно-вращательным спектром. Основываясь на этом принципе, падающий свет может производить два разных рассеяния при облучении образца. Когда падающий свет определенной частоты попадает на образец, частота падающего света, скорее всего, будет такой же, как частота рассеянного света, и частицы и молекулы будут упруго рассеиваться – это «рэлеевское рассеяние». В другом случае, когда определенная частота падающего света попадает на образец, частота падающего света не совпадает с частотой рассеянного света, и входящие фотоны будут неупруго рассеяны вместе с молекулами, составляющими образец, что является «комбинационным рассеянием».

## **2.4 Применение рамановской спектроскопии в области исследований углеродного волокна**

Углеродное волокно является разновидностью графитового углеродного материала, поэтому пространственная группа углеродного волокна следует формуле графитовой пространственной группы

$$\Gamma = 2E_{2g}(\text{R}) + E_{1u}(\text{IR}) + 2B_{2g} + A_{2u}(\text{IR})$$

В группе графитового пространства существует шесть режимов вибрации, из которых  $2E_{2g}$  – это рамановская вибрация углеродного волокна, а рамановская вибрация может быть разделена на две моды –  $E_{2g1}$  и  $E_{2g2}$ . Два разных типа вибрационных пиков представляют собой разные микроскопические эффекты, поскольку углеродный материал на основе графита представляет собой гексагональную кристаллическую систему с сетчатой структурой в узлах которой атомы углерода, поэтому существует как взаимодействие соседних

атомов углерода в плоскости, так и взаимодействие атомов углерода между слоями.  $E_{2g1}$  – это рамановская вибрация, вызванная взаимной вибрацией между соседними углеродными сетями, и соответствующая ей частота в спектре комбинационного рассеяния составляет  $47 \text{ см}^{-1}$ . Поскольку силы между слоями в сетчатом графитовом материале малы и их нелегко обнаружить, интенсивность при рамановской спектроскопии мала и ее трудно измерить.  $E_{2g2}$  относится к рамановской вибрации, вызванной взаимной вибрацией соседних атомов углерода в одной плоскости углеродного волокна, то есть телескопической вибрацией между плоскостями углеродной сетки через гибридную связь  $sp^2$ , что соответствует положению 1 в спектре комбинационного рассеяния. При  $575 \text{ см}^{-1}$   $E_{2g2}$  также известен как пик G. В графитовых материалах также имеется характерный пик D. D-пик обусловлен низкой степенью графитизации, низкой ориентацией, неполными графитовыми микрокристаллами, многими структурными дефектами, в основном вызванными граничными или другими дефектами расширения связи в  $sp^3$  гибридном состоянии. 错误!未找到引用源。 рамановской спектроскопии составляет  $1358 \text{ см}^{-1}$ , и в целом D-пик может выражать беспорядок углеродных материалов. Как правило, природный монокристаллический графит имеет только линию G и не имеет линии D [6]

## **2.5 Технология лазерного нагрева**

С развитием современных технологий ученые постепенно перестают довольствоваться высоким давлением при существующих комнатных температурных условиях. Поэтому исследователи все больше изучают новые экстремальные условия, сочетая высокое давление и высокие температуры, а также разрабатывают способы анализа свойств и структуры материалов в экстремальных условиях. В связи с этим было разработано устройство лазерного нагрева, совмещенное с конструкцией алмазной наковальни.

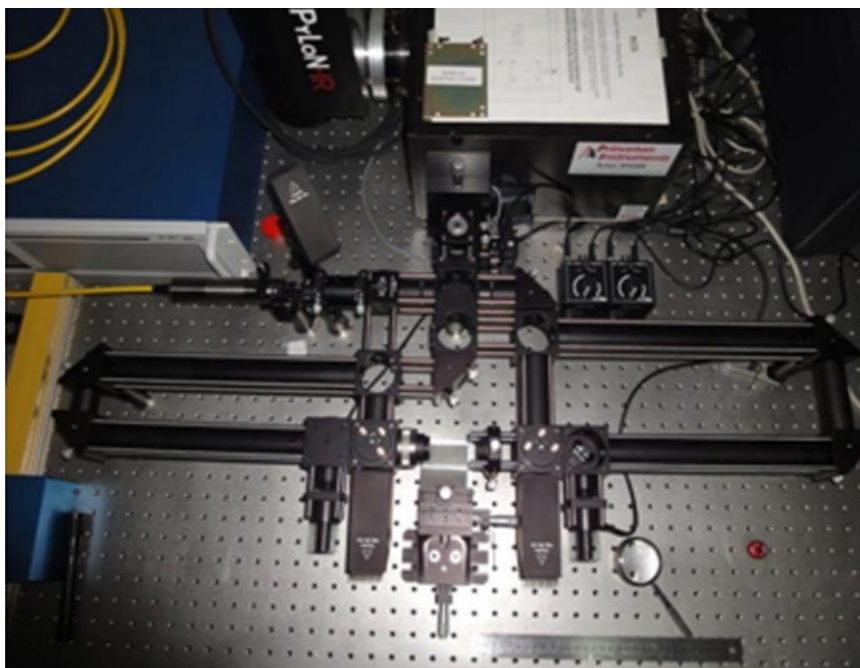


Рисунок 2.3 – Схема устройства лазерного нагрева

На этом этапе нагрев образца осуществляется в ячейке с алмазной наковальней в основном с помощью двух методов – резистивного и лазерного нагрева. Резистивный нагрев достигает невысокой температуры, обычно 900 – 1200°C, в то время как лазерный нагрев может достигать миллионов атмосфер и температуры 5000 °C или даже выше. Чтобы расширить температурный диапазон исследования изменения структуры и свойств материала, в этом эксперименте в основном использовалась технология лазерного нагрева совместно с применением алмазных наковален [[7] 错误!未找到引用源。]

Принцип работы лазерного нагрева на устройстве с верхней алмазной наковальней заключается в пропускании луча лазера (благодаря высокому коэффициенту пропускания света алмазом) через верхнее и нижнее окно к верхней наковальне, таким образом, что лазер попадает в камеру образца. После этого происходит контролируемый нагрев образца. Температуру в камере для образцов можно регулировать за счет регулировки длины волны и мощности падающего излучения лазера. В то же время верхняя и нижняя поверхности наковальни могут непрерывно находиться под давлением для достижения

условий высокого давления в полости образца, тем самым реализуя сопряжение экстремальных условий высокой температуры и высокого давления.

Устройство с лазерным нагревом на основе верхней алмазной наковальни (DAC), используемое в данном эксперименте, было разработано нашей исследовательской группой. Лазерный нагрев осуществлялся с помощью лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (Nd: YAG) с длиной волны 1064 нм. Для температурной калибровки образца внутри наковальни применялась спектроскопия излучения черного тела.

В процессе нагрева температура может превышать 1000°C. Чтобы предотвратить разрушение алмаза при температуре, превышающей термическую стабильность алмаза, необходимо использовать теплоизоляцию, как например глинозем или хлорид натрия. Также для прокладки в верхней наковальне используется металл с более высокой температурой плавления, такой как вольфрам или другие металлы 错误!未找到引用源。

## ГЛАВА 3 ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 3.1 Введение

В работе для исследования использовались образцы углеродных нановолокон диаметром 50-200 нм и длиной 1-15 мкм. Образцы исследовались рамановским спектрометром при комнатной температуре и компрессии, внешнем и лазерном нагреве при декомпрессии.

### 3.2 Характеристика углеродных нановолокон при атмосферном давлении

Анализируя данные рентгеновской дифракции, можно четко получить степень графитизации, размер кристаллитов и ориентацию зерен внутри материала. Поэтому в данной работе была выполнена порошковая характеристика образцов углеродного нановолокна с помощью рентгеновской дифракции.

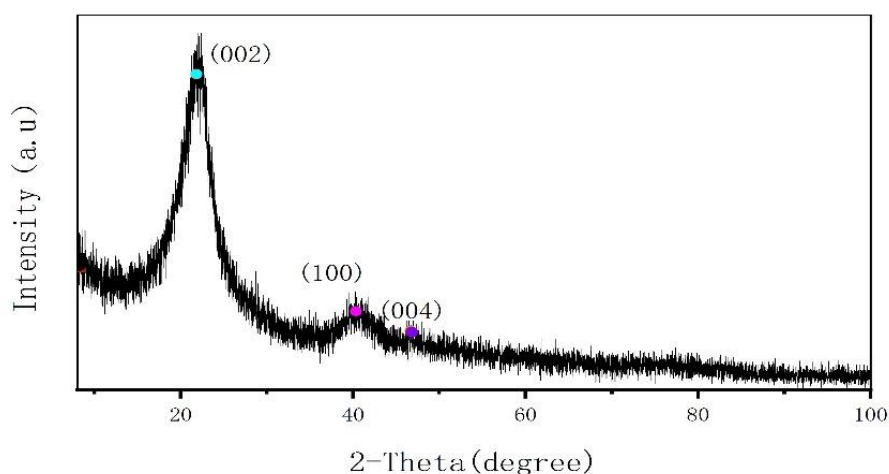


Рисунок 3.1 Дифрактограмма образца углеродных нановолокон

Анализируя рентгеновские дифрактограммы образца, мы можем четко видеть три дифракционных рефлекса на  $25^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ , из которых первый рефлекс степени соответствует (002) грани кристалла графитовой структуры, при этом дифракционный рефлекс значительно расширен, что вызвано малым размером зерна углеродных нановолокон или неполным развитием микрокристаллической структуры. Два следующих дифракционных рефлекса соответствуют (100) и

(004) кристаллическим плоскостям структуры графита, что характеризует степень развития микрокристаллитов графита по оси  $c$ . Сравнивая рентгеновские дифрактограммы этого образца с предыдущей литературой, можно увидеть, что экспериментальный предшественник, используемый в этой статье, действительно представляет собой углеродные нановолокна, а размер зерна образца очень мал.

Непосредственно перед началом эксперимента были измерены спектры комбинационного рассеяния необработанных образцов углеродного волокна для дальнейшего сравнения.

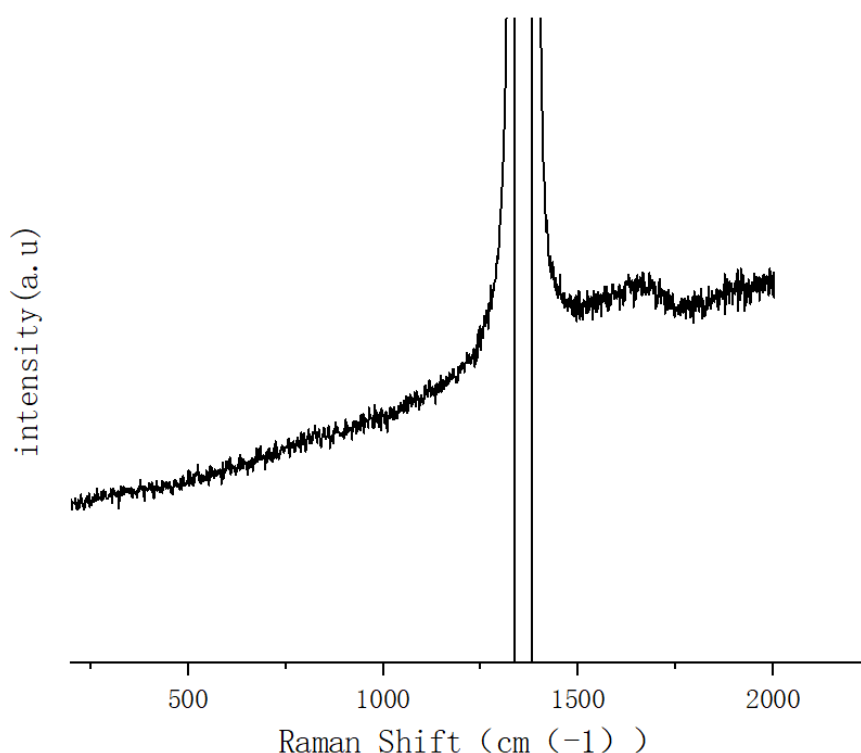


Рисунок 3.1 – Рамановский спектр необработанного углеродного волокна

### **3.3 Характеристика рамановской спектроскопии углеродных нановолокон при высоком давлении *in situ***

Затем были измерены спектры комбинационного рассеяния света при различных давлениях образца при интенсивности лазера 5% в течение 150 с. С увеличением компрессии давление образца увеличивается до 36,70 ГПа, а спектр



комбинационного рассеяния получается путем сопоставления рамановских данных после повышения давления.

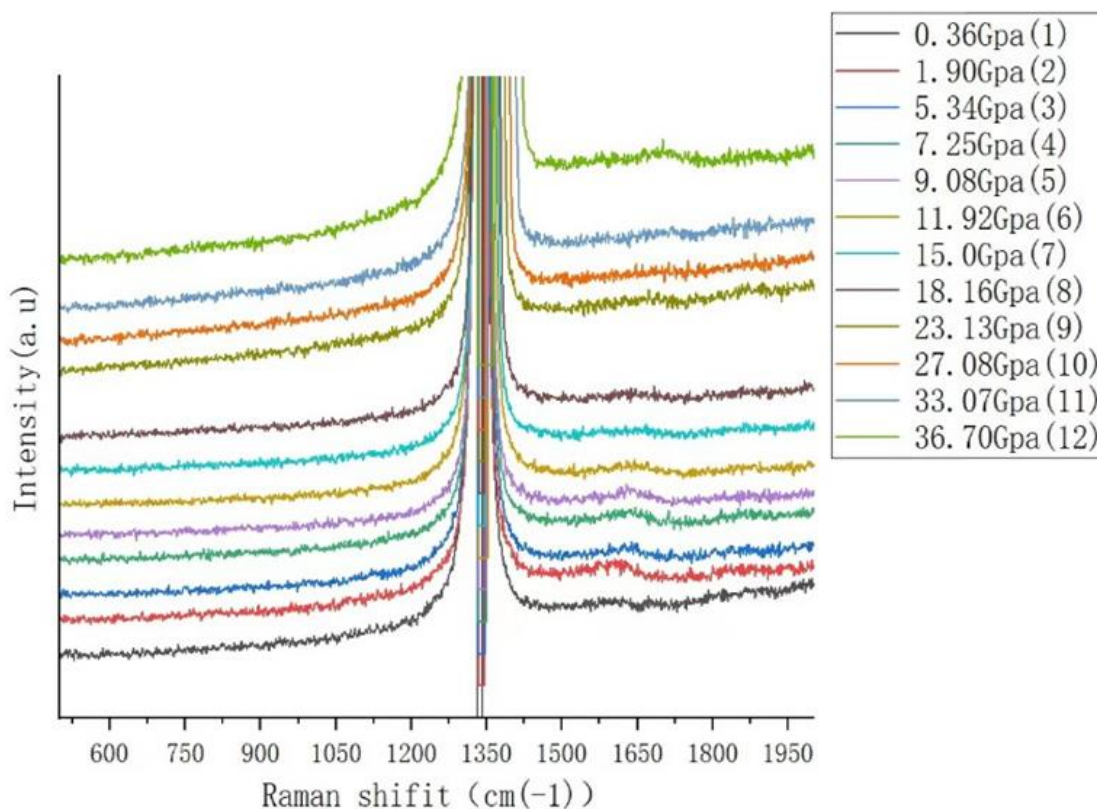


Рисунок 3.2 – Спектр комбинационного рассеяния света под давлением

На рисунке 3.2 можно наблюдать слабый пик около  $1580\text{ см}^{-1}$ , но при постепенном давлении можно наблюдать  $1580\text{ см}^{-1}$  Близлежащий пик слабее, и его труднее наблюдать, потому что лазер, выбранный для этого эксперимента, выбрал лазер с максимальной энергией до максимума, поэтому можно проанализировать, что сигнал образца, выбранный в этом эксперименте, слабый, но, хотя сигнал экспериментального образца слабый, все же можно видеть, что при постепенном давлении его все еще можно наблюдать при давлении до  $36,70\text{ ГПа}$ . Имеется слабая выпуклость около  $1580\text{ см}^{-1}$ .

Пик комбинационного рассеяния имеет явление синего смещения с увеличением давления. Обзор литературы [35] показал, что это явление синего смещения связано с изменениями напряжения внутри углеродных нановолокон. Воздействие давления сокращает длину внутренних молекулярных связей, увеличивает частоту молекулярных колебаний и заставляет спектральные линии

двигаться в направлении больших волновых чисел. Поэтому был дополнительно изучен пик G и построена зависимость давления от пик комбинационного рассеяния света и сдвига частоты пика комбинационного рассеяния света.

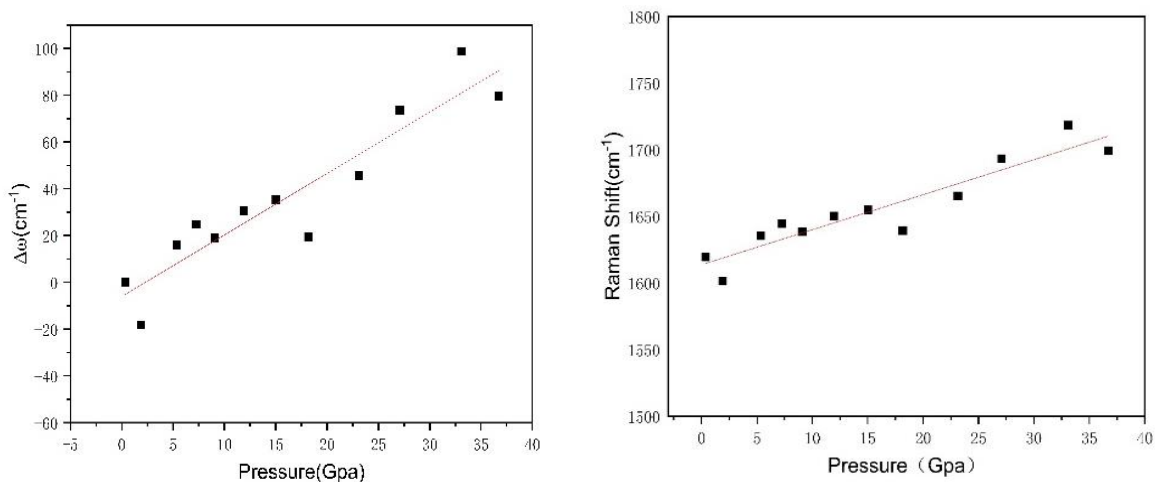


Рисунок 3.3 – Сдвиг частоты (частота) рамановского пика G углеродных нановолокон в зависимости от давления

Установлено, что частотный сдвиг рамановского пика (G-пика) и (частоты) линейно пропорциональны изменению давления, а коэффициент изменения G-пика с давлением составляет около 2,63 и, сравнивая коэффициенты графита и стеклянного углерода в одинаковых условиях, установлено, что коэффициент перехода давления в этом эксперименте ниже, чем у графита и стеклоуглерода. Это показывает, что генерируемое внутреннее напряжение ниже, чем у графита и стеклянного углерода. В то же время также показано, что деформация, вызванная приложением давления 36,70 ГПа к углеродному волокну, не превышает диапазон упругой деформации углеродных нановолокон. Впоследствии углеродные нановолокна были разгерметизированы, и было обнаружено, что явление синего смещения постепенно восстановилось. Результаты согласуются с теоретическими предсказаниями.

Ширина полупика (FWHM) рамановской спектроскопии также является полезной информацией для характеристики внутренних изменений молекулярной структуры углеродных нановолокон. Более узкая ширина

полуширины (FWHM) указывает на более однородную внутреннюю структуру и более последовательные химические связи. Сравнивая спектральную ширину полуширины комбинационного рассеяния света (FWHM) при разных значениях давления, существенных изменений обнаружено не было. Инструкции находятся под давлением 36 В процессе 70 ГПа, хотя и происходит изменение напряжения, внутренние химические связи не смещаются, и не происходит структурного фазового изменения.

Однако по сравнению с графитом, который также является углеродным материалом  $sp^2$ , графитовые микросферы имеют явление G-банджирования при одноосном давлении только при давлении 24 ГПа, что указывает на то, что микронные сферы графита претерпели превращение химической связи в условиях 24 ГПа. Однако в этом эксперименте при давлении 36,70 ГПа спектр комбинационного рассеяния света все же существенно не изменился. Чтобы изучить причины этого явления, была проведена консультация с предыдущей литературой. Были обнаружены следующие две причины:

1. Углеродные нановолокна, используемые в этом эксперименте, имеют диаметр 50-100 нм и выглядят как тонкие волокна, в то время как графит получается из стеклоуглерода в условиях высокой температуры и высокого давления с образованием графитовых микросфер диаметром 3,5 мкм. Следовательно, эта разница в форме и диаметре приведет к различным одноосным напряжениям, создаваемым в образце при одинаковых условиях давления, сферических и были изучены, чтобы указать, что одноосные напряжения являются причиной изменения графита из  $sp^2$  в  $sp^3$  гибридное состояние. Следовательно, при тех же условиях графит, где легче получить одноосное напряжение, будет иметь изменения связи при более низких давлениях.
2. Внутренняя структура углеродных нановолокон также отличается от графита, который представляет собой упорядоченный шестичленный кольцеобразный углеродный материал, в то время как углеродные

нановолокна представляют собой двумерные упорядоченные и трехмерные неупорядоченные углеродные материалы. Таким образом, по сравнению с графитом, материалы из углеродных нановолокон имеют более высокий беспорядок, и предыдущие исследования показали, что материалы с более высоким беспорядком часто требуют более высоких давлений, если они хотят достичь трансформации связи путем повышения давления [39]

Углеродные нановолокна представляют собой двумерный упорядоченный или трехмерный неупорядоченный материал типа  $sp^2$  по сравнению с графитом.

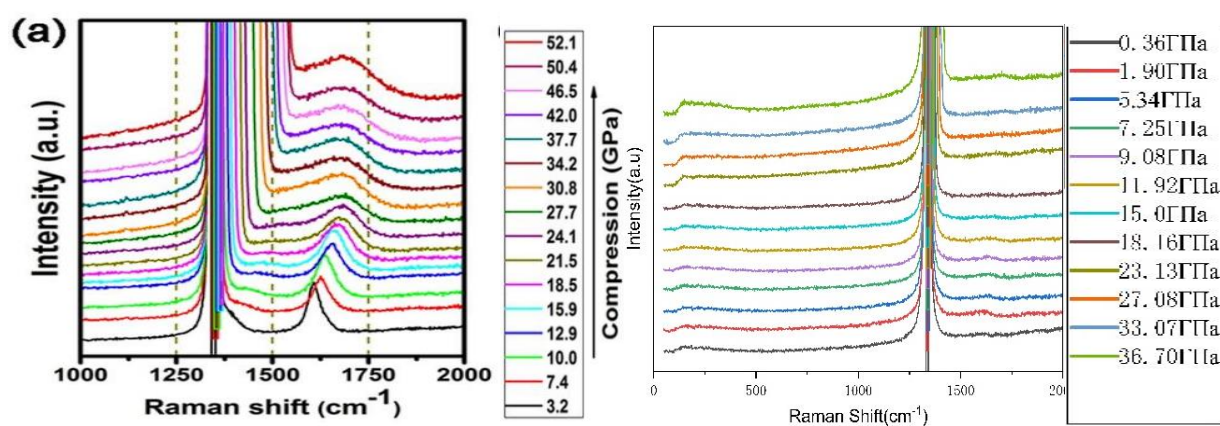


Рисунок 3.4 – Комбинационная диаграмма графита при одноосном высоком давлении (слева) и комбинационная диаграмма (справа) при высоком давлении углеродных нановолокон

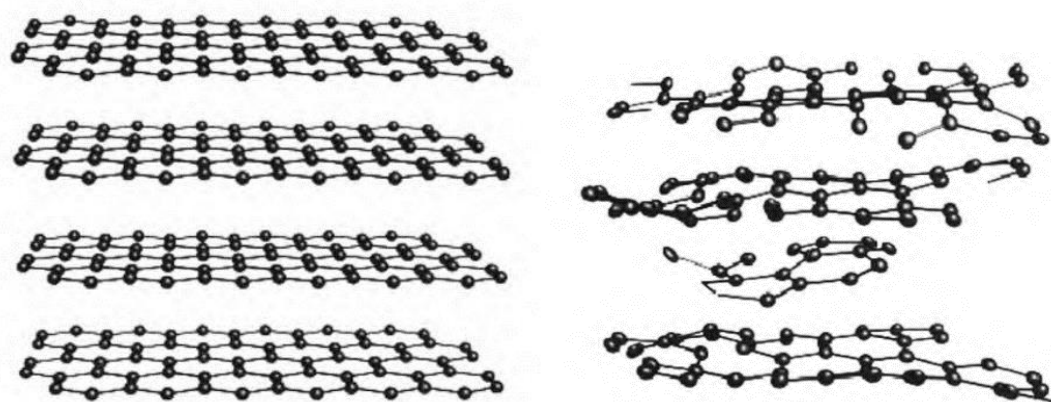


Рисунок 3.5 – Диаграмма микроструктуры графита (слева), диаграмма микроструктуры углеродного нановолокна (справа).

После непрерывного повышения давления образец разгерметизируется, и ряд данных получается с помощью алмазного стандартного давления, и полученные данные сортируются для получения спектра комбинационного рассеяния комбинационного рассеяния декомпрессии.

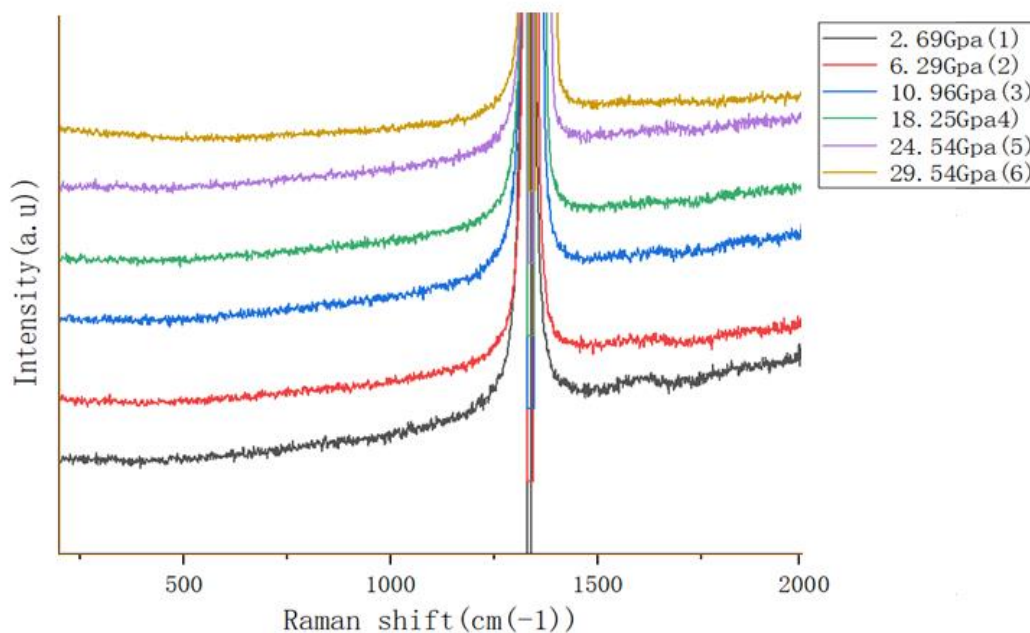


Рисунок 3. 6 – Рамановский спектр при декомпрессии

Точно так же наблюдение пика G углеродного волокна после сброса давления все еще относительно незначительно, но все же можно видеть, что 1580 см<sup>-1</sup> все еще можно наблюдать после сброса давления обратно до 2,69 ГПа. Согласно приведенному выше анализу причин пиков G, можно проанализировать, что G вызван гибридизацией sp<sup>2</sup> во время повышения давления. Пик не преобразуется в D-пик, образованный гибридизацией sp<sup>3</sup>.

### 3.4 Эксперимент по нагреву углеродного нановолоконного лазера

Затем углеродное волокно было нагрето более чем на 2000°C с помощью лазера мощностью 4Вт.

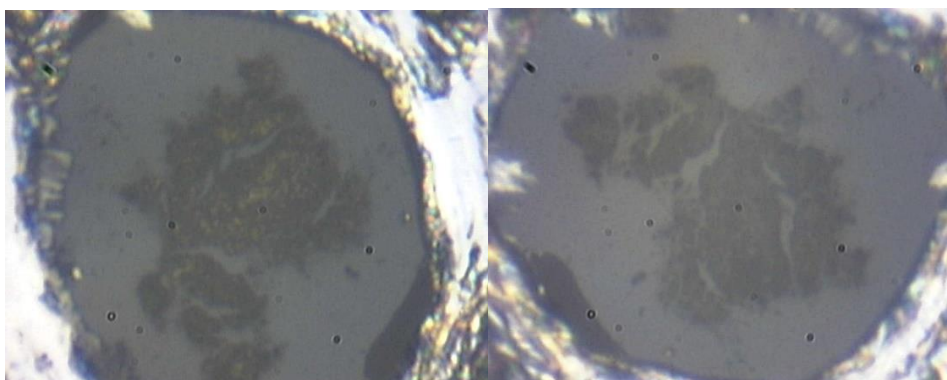


Рисунок 3.7 – Оптический снимок углеродных нановолокон до (слева) и после (справа) нагрева

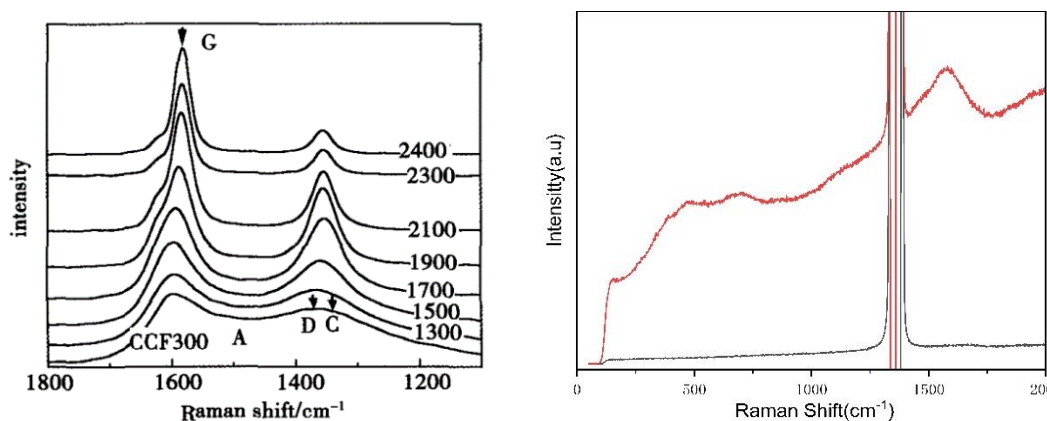


Рисунок 3.7 – Нагрев до более чем 2000°C (слева) при нормальном давлении. Сравнительный спектр нановолокон при 25ГПа до и после лазерного нагрева (справа).

Сравнивая данные образцов до и после лазерного нагрева и рамановскую диаграмму, можно обнаружить, что цвет образца меняется от черного до прозрачного, а пик G образца около  $1600\text{ см}^{-1}$  кажется смещенным в красную область, и появляется более очевидная широкая огибающая.

На основе обзора литературы исследован механизм явления красного смещения и установлено, что причиной этого явления красного смещения является самопроизвольное удлинение и сокращение углерод-углеродных связей, вызванное тепловыми эффектами и остаточным напряжением внутри решетки [10] Впоследствии было обнаружено, что при атмосферном давлении и

температурном режиме, превышающем 2000°C, в углеродных нановолокнах будет переходить тепло от углерод-углеродной одинарной связи к углеродной шестичленной кольцевой структуре с большей длиной связи и более высокой энергией, вследствие чего происходит графитизация, а спектральный пик комбинационного рассеяния света после графитизации значительно сужается по сравнению с этим экспериментом. Это показывает, что в процессе лазерного нагрева и повышения давления происходит графитизация.

После лазерного нагрева и повышения давления образец изменился с черного на полупрозрачный, поэтому было предположено, что при условии 25 ГПа и температуре более 2000°C, углеродные нановолокна могут казаться похожими на графит, а стеклянный углерод существует в  $sp^2$  гибридизации. Явление перехода от  $sp^2$  к  $sp^3$  гибриднему состоянию в углеродных материалах происходит в условиях высокой температуры и высокого давления. По литературным данным [39] установлено, что причиной этого явления является типичный процесс диффузионного фазового перехода, который согласуется с предыдущим превращением неграфитового фазового источника углерода в алмаз при высокой температуре и давлении, в результате чего фаза  $sp^2$  превращается в  $sp^3$  фазу.

Следующим шагом нагретый образец сжимают до 25 ГПа, после чего проводятся *in situ* измерения рамановских спектров с 5% интенсивностью света за время 100 с при декомпрессии.

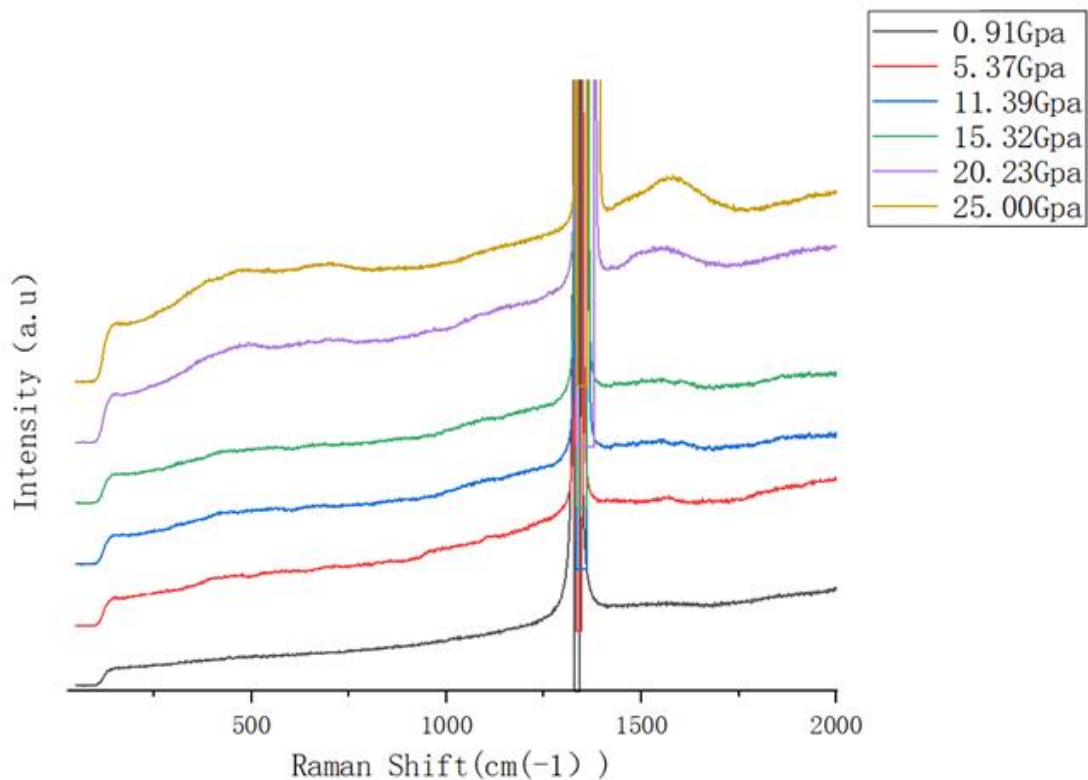


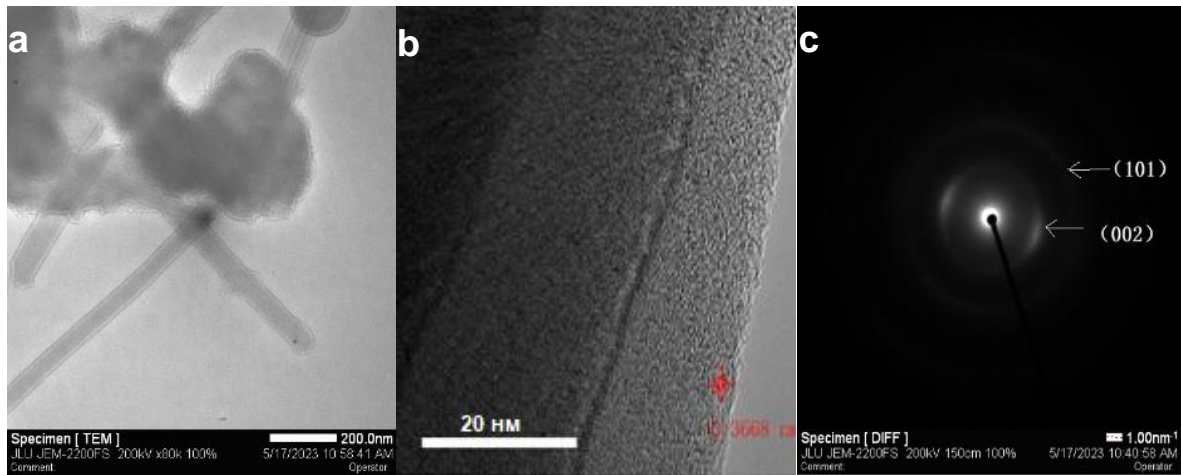
Рисунок 3.4 – Рамановская диаграмма сброса давления после лазерного нагрева

После лазерного нагрева и повышения давления, по сравнению с необработанным образцом углеродного волокна, можно увидеть, что пик G, который первоначально составлял около  $1580 \text{ cm}^{-1}$ , имеет значительный сдвиг влево, что приводит к такой ситуации. Причина в том, что из-за нагрева высвобождается остаточное напряжение внутри углеродного волокна, а микроскопическая причина заключается в том, что спонтанный раствор связи C-C, образованный гибридизацией  $sp^2$  错误!未找到引用源。 может хорошо высвобождать остаточное напряжение.

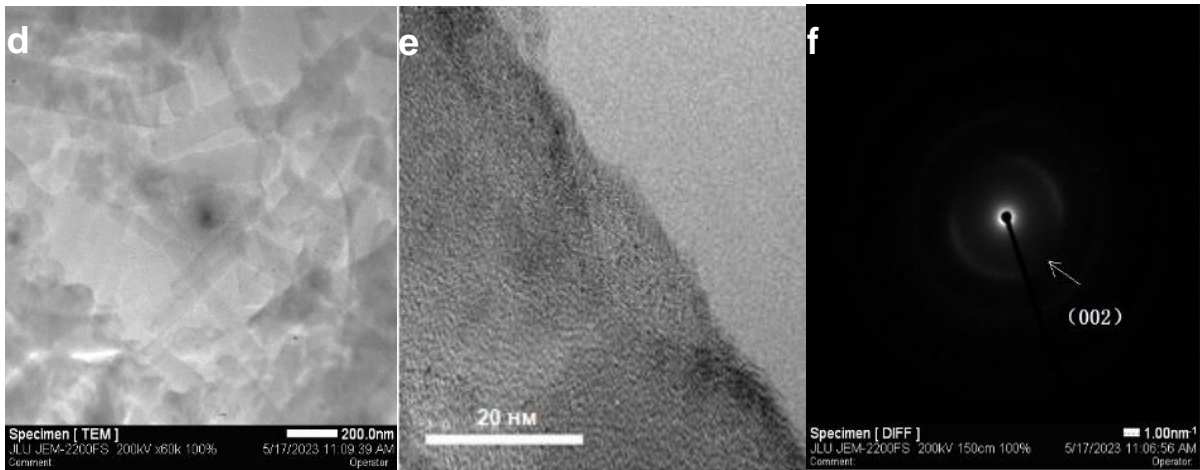
### 3.5 Электронная микроскопия углеродных нановолокон

С целью дальнейшего определения механизма действия наддува и лазерного нагрева на углеродные нановолокна мы использовали электронный микроскоп JEM-2200FS для проведения анализа электронной микроскопии трех групп углеродных нановолокон.

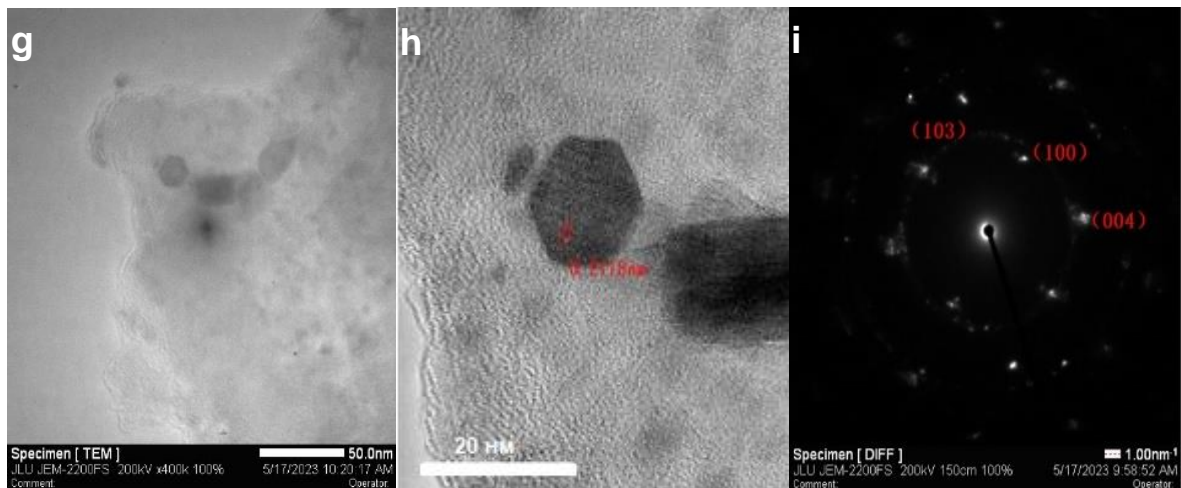




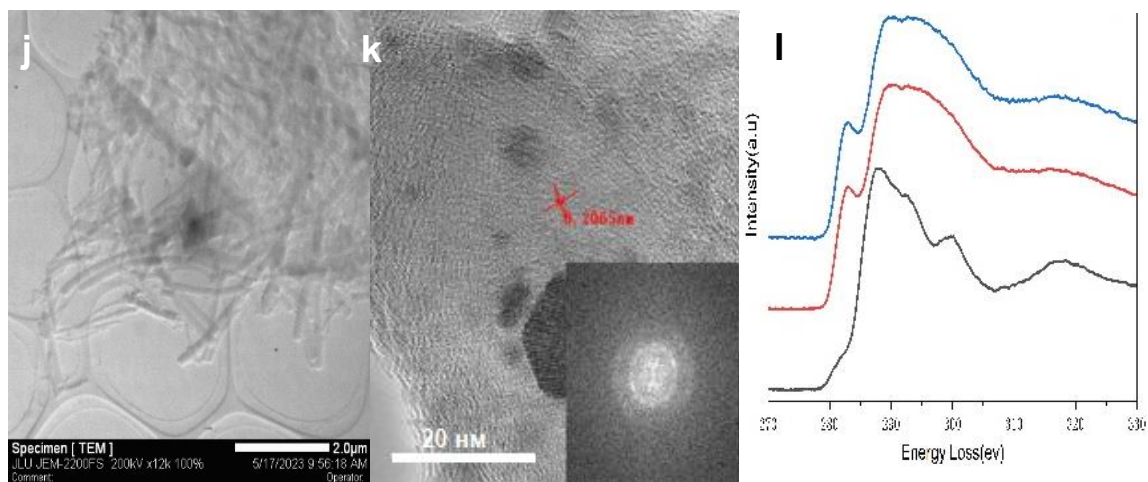
а) нормальная температура, нормальное давление, ПЭМ; (b) нормальная температура, нормальное давление, ПЭМ; (c) электронная дифракция при нормальной температуре и давлении



d) ПЭМ под давлением; e) ПЭМ под давлением; f) электронная дифракция под давлением



(g) после лазерного нагрева, ПЭМ; (h) после лазерного нагрева, ПЭМ; (i) электронная дифракция после лазерного нагрева



(j) после лазерного нагрева, ПЭМ; (k) после лазерного нагрева, ПЭМ; (l) спектры энергии потерь электронов

Рисунок 3. 9 – Микрофотографии углеродного волокна, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии

Во-первых, мы использовали просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) для характеристики морфологии углеродных нановолокон при комнатной температуре и давлении. По данным электронной микроскопии высокого разрешения видно, что исходные углеродные нановолокна выглядели как удлиненные волокна по форме, а дальнейшее наблюдение углеродных нановолокон с использованием зеркал с более высоким увеличением показало, что внутренняя структура углеродных нановолокон показала упорядоченные/неупорядоченные аморфные структуры ближнего порядка на большом расстоянии. Это согласуется с наблюдением рентгеновской дифракции, где микрокристаллическая структура внутри углеродных нановолокон является неполной. Затем был измерен энергетический спектр потерь электронов (EELS) углеродных нановолокон при комнатной температуре и давлении, и в месте подъема пика ионизации К сначала наблюдается более узкий пик около 284 эВ, который также называется пиком  $\pi^*$ , соответствующим 2p-орбитали, которая не участвует в гибридизации, перекрывая друг друга, образуя большую

делокализацию  $\pi$  связей. Таким образом,  $sp^2$ -гибридизация внутри углеродных нановолокон может характеризоваться пиками  $\pi^*$ . При этом в спектре энергетических потерь электронов наблюдался пик  $\sigma^*$  290 эВ, что соответствует комбинации центрального атома углерода и окружающего атома углерода, а C-C соответствует связи  $\sigma$ . Пики  $\sigma^*$  можно использовать для характеристики гибридации  $sp^3$  внутри образца. Спектр энергии потерь электронов углеродных нановолокон при комнатной температуре и давлении и спектр энергии потерь электронов аморфного углерода были аналогичными, что дополнительно подтвердило, что образцы углеродных нановолокон плохо кристаллизуются при комнатной температуре и давлении.

Впоследствии микрофотографии ПЭМ были использованы для характеристики внешнего вида образцов углеродных нановолокон, подвергнутых влиянию избыточного давления. Было обнаружено, что углеродные нановолокна, подвергнутые избыточному давлению, имели короткие и тонкие волокнистые формы, что указывает на то, что образцы углеродных нановолокон были разрушены при работе под высоким давлением. С целью дальнейшего изучения влияния высокого давления на углеродные нановолокна на микроскопическом уровне было использовано пропускающее зеркало с большим увеличением для наблюдения за внутренней структурой образца, вследствие чего было обнаружено, что углеродные нановолокна в условиях высокого давления все еще находились в неупорядоченном аморфном состоянии ближнего действия. Чтобы определить, есть ли фазовый переход внутри, был получен спектр энергии потерь электронов после повышения давления. Сравнивая его со спектром потерь энергии электронов при комнатной температуре и давлении, было обнаружено, что спектр потерь энергии электронов после повышения давления хорошо сочетается со спектром потерь энергии электронов при комнатной температуре и давлении, что означает, что материал остается аморфным. Показано, что высокое давление не изменяет структурное состояние внутри углеродных нановолокон, что согласуется с результатами, проанализированными с помощью рамановской спектроскопии.

Соответственно 36,7 ГПа не достаточно давление для модифицирования углеродных нановолокон.

Таким же образом были охарактеризованы углеродные нановолокна после лазерного нагрева и наблюдалось обычное гексагональное непрозрачное вещество под область пропускания, поэтому сравнили ПЭМ и зональные диаграммы дифракции электронов, чтобы определить, что непрозрачным материалом был графит. Доказано, что процесс графитизации происходит в процессе лазерного нагрева, а затем наблюдается появление кристаллов алмаза рядом с кристаллами графита. Дальнейшая спектроскопия энергии потерь электронов показала, что пиковый сигнал образца углеродного нановолокна  $\pi^*$  был значительно ослаблен после сброса давления, что еще раз подтвердило образование образцов алмазов внутри образцов углеродных нановолокон.

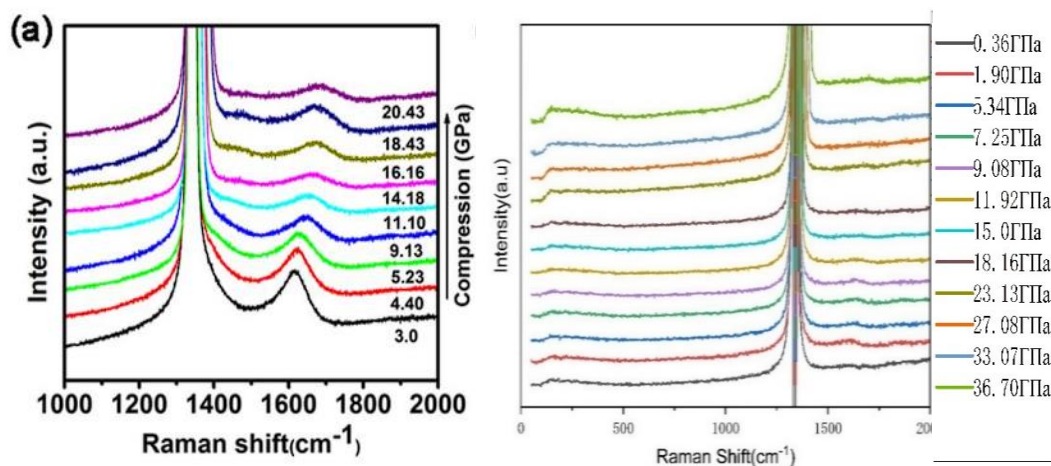


Рисунок 3.10 – спектры стеклоуглеродных волокон под давлением с рамановской спектроскопией 20 ГПа (слева) углеродных нановолокон под давлением до 36,7 ГПа

Впоследствии мы сравнили углеродные нановолокна после лазерного нагрева и компрессии со стеклообразным углеродом в тех же условиях, а также исследовали литературу предшественников [39] благодаря операции компрессии было обнаружено, что стеклоуглеродный рамановский спектр проявляет явление синего смещения только при давлении до 20 ГПа, а образцы углеродных нановолокон остаются черными при давлении до 20 ГПа. Было объяснено, что

этот процесс не показал каких-либо структурных изменений, которые проявляли те же свойства, что и образцы углеродных нановолокон при комнатной температуре и давлении.

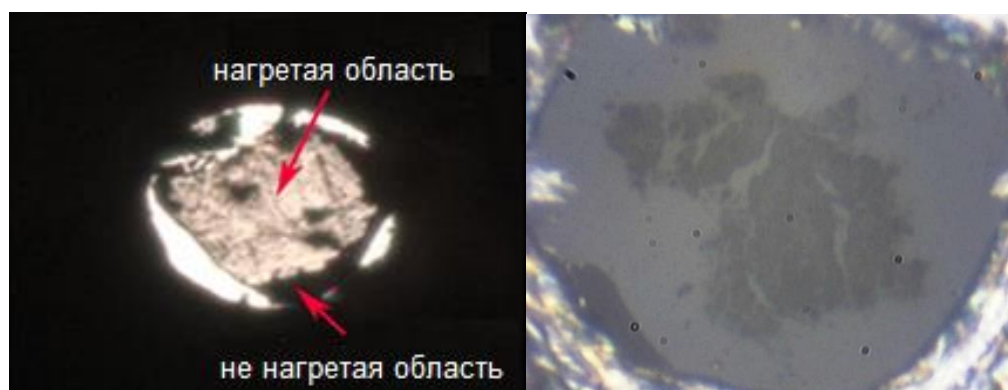


Рисунок 3.11 – Образец стеклоуглерода после лазерного нагрева (слева)  
Образец углеродного нановолокна после лазерного нагрева (справа).

Доказано, что углеродные нановолокна материалов  $sp^2$ , которые являются относительно неупорядоченными, относительно стабильны при 20 ГПа, что указывает на то, что в условиях высокого давления углеродные материалы с высоким беспорядком нуждаются в более высоком давлении для достижения изменений связи. Затем стеклоуглерод частично нагревали и выдерживали под давлением, и образец был прозрачным в условиях 2300 К и 20 ГПа.

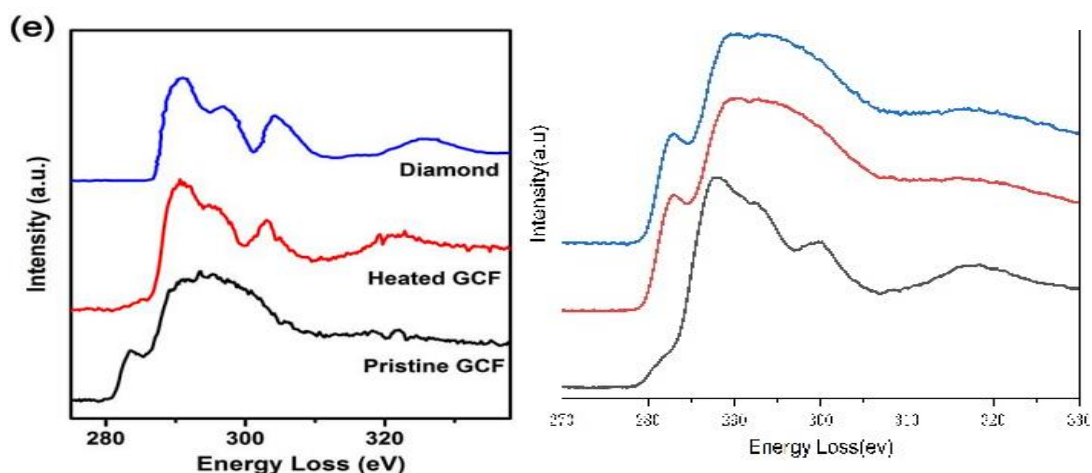


Рисунок 3. 1 – Спектры энергетических потерь электронов после лазерного нагрева стеклоуглерода (слева) и углеродного нановолокна (справа)

Изучая спектры энергетических потерь электронов стеклянного углерода после лазерного нагрева, установлено, что в этом процессе также происходит

графитизация, а также образуются кристаллы алмаза. По сравнению с углеродными нановолокнами, результаты изменений аналогичны, поэтому можно обоснованно предположить, что такое подобное поведение может иметь следующие две причины:

1. Все первоначальные образцы представляли собой образцы аморфного углерода с низкой степенью графитизации, поэтому кристаллы графита могут быть получены при условии лазерного нагрева с температурой превышающей 2000°C;

2. В образце с  $sp^2$ -гибридизацией высокая степень беспорядка, поэтому условия получения образцов алмазов аналогичны.

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

Студенту:

Группа **ФИО**  
 150Б91 **Ню СЫЯО**

Школа Уровень образования	Бакалавриат	Отделение школы (НОЦ) Направление/специальность	03.03.02 «Физика»
------------------------------	-------------	--	-------------------

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

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Затраты на сырьё, размер окладов, затраты на электроэнергию, амортизационные расходы</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Согласно проектной документации. Районный коэффициент 1.3</i>
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30%</i>

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

<i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Потенциальные потребители результатов исследования; проведение анализа конкурентоспособности.</i>
<i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>цели и результаты проекта; организационная структура проекта.</i>
<i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>бюджет научно-технического исследования.</i>

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

*Оценка конкурентоспособности НИ;*  
*SWOT- анализ;*  
*Бюджет затрат научно-технического исследования*  
*Основные показатели эффективности НИ*

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Ню СЫЯО		

## ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой настоящей выпускной квалификационной работы является: исследование рамановских спектров углеродных нановолокон при высоком давлении и лазерном нагреве.

В настоящее время научные исследования должны учитывать не только передовые разработки научных тем, но и коммерческую ценность научных тематических исследований.

Целью выполнения финансово-экономической части выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования. Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческой ценности исследований и коммерческого потенциала
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

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

Потенциальными группами потребителей результатов этого исследования являются организации в области аэрокосмического производства, ветроэнергетики, медицины и других областях, а потенциальные области потребления, к которым применяется это исследование, должны контролировать затраты, насколько это возможно, выбирать материалы для недорогого производства и максимально продлевать срок службы материалов. Таким образом, потенциальными группами, которые могут быть применены к этому исследованию, являются крупные отраслевые предприятия и некоторые некоммерческие государственные предприятия .



Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, нам нужно тщательно исследовать и классифицировать потенциальных потребителей.

Выбранные основные характеристики потребителей сегмента:

Месторасположение – регионы с развитыми отраслями тяжелой промышленности (Ветеринарная медицина).

Отношение к услуге – готовность внедрять новые технологии в технологический процесс.

Закупочные принципы – компании, проводящие централизованный закуп услуг.

Поскольку ранее в России не было исследований, связанных с изучением материалов из углеродного волокна под высоким давлением, большинство организаций проявили бы большой интерес к результатам.

## **4.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.**

### **4.2.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Поскольку для исследования углеродного волокна не требуется углеродное волокно с особенно высокой чистотой, в этом эксперименте используется углеродное волокно с 96% чистотой, что может снизить стоимость эксперимента.

Детальный анализ конструктивного исполнения необходим, т.к. каждый тип конструктивного исполнения имеет свои достоинства и недостатки. Данный анализ производится с применением оценочной карты. 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. Б<sub>ф</sub> –

высокоинтенсивная модификация внутренней поверхности отверстий пучками ионов азота низкой энергии.  $B_{K1}$  – нанесение защитных покрытий.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, для этого были отобраны 2 конкурентные разработки. Расчет показателя конкурентоспособности производился по формуле:

$$K = \sum iB_i \cdot V_i, \quad (5.1)$$

где  $B_i$  – бал  $i$ -го показателя,  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 2 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		$B_1$	$B_2$	$K_1$	$K_2$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	4	4	0,4	0,4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителям)	0,1	4	3	0,2	0,15
3. Помехоустойчивость	0,01	4	2	0,2	0,1
4. Энергоэкономичность	0,06	4	4	0,2	0,2
5. Надежность	0,1	4	3	0,4	0,3
6. Уровень шума	0,01	3	3	0,15	0,15
7. Безопасность	0,1	5	5	0,05	0,05
8. Потребность в ресурсах памяти	0,1	4	4	0,4	0,4
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,01	5	3	0,5	0,3
10. Простота эксплуатации	0,07	4	4	0,2	0,2
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,01	4	4	0,2	0,2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,01	5	5	0,05	0,05
Экономические критерии оценки эффективности					

1. Конкурентоспособность продукта	0,05	4	3	0.2	0.15
2. Уровень проникновения на рынок	0,02	5	5	0.1	0.1
3. Цена	0,04	4	4	0.12	0.12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,03	4	4	0.12	0.12
5. Послепродажное обслуживание	0,01	4	4	0.04	0.04
6. Финансирование научной разработки	0,05	4	5	0.32	0.4
7. Срок выхода на рынок	0,05	4	4	0.2	0.2
8. Наличие сертификации разработки	0,01	4	4	0.04	0.04
Итого	1	83	77	4.09	3.67

Исходя из данных таблицы 2, конкурентоспособность разработки научного исследования механических свойств изделий из Углеродное волокно после высокого давления(Б<sub>1</sub>) составило 4.09, против 3.67 исследования механических свойств изделий из углеродное волокно в норме(Б<sub>2</sub>).

#### 4.2.2 SWOT – анализ

SWOT – Сильные стороны (сильные стороны), Слабые стороны (слабые стороны), Возможности (возможности) и Угрозы (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

Сильные стороны – это факторы, которые характеризуют конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Указывают на отличительное преимущество проекта или ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Возможности включают в себя предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза – это любая нежелательная ситуация, тенденция или изменение в условиях окружающей среды проекта, которая имеет разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

SWOT-анализ можно осуществить и представить в виде интерактивной матрицы работы, таблица 2, а также результирующих таблиц возможностей и угроз НИР, таблицы 3.

Каждый фактор таблицы 2 помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» / «-».

Таблица 2 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	0
	B2	+	+	-	-
	B3	-	-	+	0

Таблица 3 – SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта: С1. Актуальность; С2. Применение современного оборудования; С3. Квалифицированный персонал; С4. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.	Слабые стороны проекта: Сл1. Высокая стоимость. Сл2. Малый круг потребителей. Сл3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл4. Отсутствие прототипа научной разработки.
Возможности: В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В2. Снижение	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:

<p>таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях. ВЗ. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>1. Обеспечение условий для создания кадров в области создания пористых структур для медицинского применения. 2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.</p>	<p>1. Необходимо финансирование на модернизацию, что возможно реализовать в условиях вуза. 2. Расширение круга потребителей путем модернизации системы.</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Благодаря возможностям системы своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным. 2. Повышение конкурентоспособности после модернизации разработки.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Относительно высокая стоимость, и ограниченный круг потребителей может вызвать низкий спрос со стороны заказчиков.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта. Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

#### **4.3 Планирование научно-технического исследования**

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведено распределение исполнителей по видам

работ. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- разработка задания;
- теоретические исследования;
- составление порядка эксперимента, выбор технических режимов;
- Приобретение необходимых образцов;
- изготовление подготовка исследуемых образцов к исследованиям;
- экспериментальные исследования;
- оценка результатов экспериментов;
- оформление отчёта по ВКР;
- подготовка к защите ВКР.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Распределение исполнителей и этапы выполняемых работ

Основные этапы	Но раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, лаборант (дипломник)
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель, лаборант
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, лаборант
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, лаборант
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, лаборант
	7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель, лаборант, сотрудник-техник (дипломник)
	8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер

	9	Подготовка исследуемых образцов к проведению экспериментов	Инженер
	10	Проведение экспериментов	Руководитель, лаборант, сотрудник-техник (дипломник)
	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями и подготовка к участию в конференции	Руководитель, лаборант
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов и участие в конференции	Руководитель, лаборант
	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, лаборант

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на лаборанта (дипломника).

#### 4.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Затраты на рабочую силу также являются частью затрат на разработку в исследовании диссертации, поэтому нам нужно определить трудоемкость каждого участника

С целью определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используем следующую формулу:

$$t_{ож} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (5.2)$$

где  $t_{ож}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел. дн.;  $t_{\min}$  – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел. дн.;  $t_{\max}$  – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел. дн. Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 36 + 2 \cdot 95}{5} = 59,6 \text{ чел. – дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 22}{5} = 13,6 \text{ чел. - дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для лаборанта:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot 56 + 2 \cdot 134}{5} = 87,2 \text{ чел. - дн.}$$

Далее определим продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i} \quad (5.3)$$

где  $T_{di}$  – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.;  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения одной работы, чел.-дн.;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}} = \frac{59,6 \text{ чел. - дн.}}{1} \cdot 1 = 59,6 \text{ раб. дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{\text{рд}} = \frac{13,6 \text{ чел. - дн.}}{1} \cdot 1 = 13,6 \text{ раб. дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для лаборанта:

$$T_{\text{рд}} = \frac{87,2 \text{ чел. - дн.}}{1} \cdot 1 = 87,2 \text{ раб. дни}$$

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:



$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}}, \quad (5.4)$$

где  $T_{\text{КД}}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;  $T_{\text{К}}$  – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (5.5)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{ВД}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{ПД}}$  – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 4.4:

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 115} = 1,46$$

Построим таблицу 6 по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни $T_{РД}$			Длит. работ в кален. дни $T_{КД}$		
	$t_{\min}$ , чел.-дн			$t_{\max}$ , чел.-дн			$t_{ОЖ}$ , чел.-дн			НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ
	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ	НР	СТ	ЛАБ						
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	5	-	-	3,2	-	-	3,2	-	-	4,7	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	6	1	6	21	-	30	12	0,6	15,6	12	0,6	15,6	17,5	0,9	23
Проведение патентных исследований	4	-	6	6	-	15	4,8	-	9,6	4,8	-	9,6	7,0	-	14,0
Выбор направления исследований	3	-	4	5	-	8	3,8	-	5,6	3,8	-	5,6	5,5	-	8,2
Календарное планирование работ по теме	2	-	4	5	-	5	3,2	-	4,4	3,2	-	4,4	4,7	-	6,4
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	6	6	-	10	4,8	-	7,6	4,8	-	7,6	7,0	-	11,1
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	1	1	3	4	7	5	2,2	3,4	3,8	2,2	3,4	3,8	7,1	5,0	5,5
Изготовление исследуемых образцов	-	-	2	-	-	4	-	-	2,8	-	-	2,8	-	-	4,1
Подготовка образцов к проведению экспериментов	-	-	7	-	-	12	-	-	9	-	-	9	-	-	13,1
Проведение экспериментов	4	6	5	15	15	15	8,4	9,6	8	8,4	9,6	8	12,3	14,0	11,7
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими	4	-	6	10	-	12	6,4	-	8,4	6,4	-	8,4	9,3	-	12,3

исследованиями; подготовка к конференции*																
Оценка эффективности полученных результатов; участие в конференции**	3	-	3	10	-	10	5,8	-	5,8	5,8	-	5,8	7,1	-	7,1	
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	4	8	-	8	5	-	5,6	5	-	5,6	7,3	-	8,2	
Итого	36	8	56	95	22	134	59,6	13,6	87,2	59,6	13,6	87,2	87,0	19,9	127,3	

## 4.4 Бюджет научного исследования

### 4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

В данном разделе составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоят из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления и накладные расходы.

В статью расходов входят затраты на приобретение материалов, комплектующих изделий, необходимых для выполнения работ по данному научному исследованию. В таблице 8 приведены расходы по данной статье.

Таблица 8 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Углеродное волокно	г	100	120	120
Хлопковая палочка	Корень	20	10	10
Спирт	100 мл	2	45	90
Прокладка	кусок	1	10	10
Халат	М	1	500	500
Набор лабораторных инструментов	Малый	1	1000	1000
Чашка Петри	80x17	1	400	400
Всего за материалы				2120
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				250
Итого по статье				2370

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на Набор лабораторных инструментов

### 4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В рамках выполнения исследования использовалось имеющееся в собственности ИФПМ СО РАН оборудование, и закупка дополнительного специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют. Однако в ходе эксплуатации оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными

отчислениями. Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

$$H_A = \frac{1}{n} = 0,1, \quad (5.6)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет

Амортизация:

$$A_M = \sum \frac{I \cdot H_A}{12} = 19866 \text{рублей}$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.; – время использования, мес.  $M$

Таблица 9 – Амортизационные расходы

	Наименование оборудования	Ст-ть, руб.	Срок полезного исп., лет	$H_A$ , %	Время исп., мес.	Амортизационные расходы, руб
1	Микроконфокальный спектрометр Рамана	1000000	10	10	1	8333
2	Инфракрасный спектрометр высокого давления	132000	10	10	2	2200
3	Оптический микроскоп Quanta 200 3D	500000	10	10	2	8333
4	Компрессор	30000	5	20	2	1000
Итого:						19866

#### 4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{\text{ЗП}} = Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОП}} \quad (5.7)$$

где  $Z_{\text{ОСН}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{ДОП}}$  – дополнительная заработная плата (12-20% от  $Z_{\text{ОСН}}$ ).

Основная заработная плата одного работника:

$$Z_{\text{ОСН}} = Z_{\text{ДН}} \cdot T_{\text{Р}} \quad (5.8)$$

где  $T_{\text{Р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;  $Z_{\text{ДН}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{\text{ДН}} = \frac{Z_{\text{М}} \cdot M}{F_{\text{Д}}} \quad (5.9)$$

где  $Z_{\text{М}}$  – месячный должностной оклад работника, руб;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 10 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели, в таблице 11 представлен расчет основной заработной платы.

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	115
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	20
Действительный годовой фонд рабочего времени	230

Таблица 11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Фонд, з/платы, руб
Научный руководитель	67000	430,3	59,6	103400,5
Сотрудник-техник	47000	538,9	13,6	65000,3
Лаборант (дипломник)	-	-	87,2	-
Итого				168400,8

По данным таблицы 11 получены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

#### 4.4.4 Дополнительная заработная плата

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (5.10)$$

где,  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0.15 \cdot 103400.5 = 15510.08 \text{руб.}$$

Дополнительная заработная плата сотрудника-техника:

$$Z_{\text{доп}} = 0.15 \cdot 65000.3 = 9750.05 \text{руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 25260.13рубль.

#### 4.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Данные расходы включают обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2021 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%)

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot Z_{\text{осн.}} = 78450 \cdot 0.3 \approx 23535 \text{руб} \quad (5.11)$$

где  $k_{\text{внеб.}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды ( $k_{\text{внеб.}} = 0,3$ ).

#### 4.4.6 Расчет затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 8 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 3

часа. Стоимость электроэнергии в Чанчуне составляет 5.150 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об.}} \cdot C_{\text{э}} \cdot t_{\text{об.}}, \quad (5.12)$$

где  $P_{\text{об.}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $C_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;  $t_{\text{об.}}$  – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{\text{об.}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{эл.об.}}$ , руб.
Персональный компьютер	567	0,3	876,02 г.
Комплексная технологическая установка	48	8	1977,60
Итого			2853,62

#### 4.4.7 Формирование бюджета затрат НТИ

Расчет бюджета затрат в результате проведения НТИ представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Бюджет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты	2370
Затраты на специальное оборудование для научных работ	19866
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	168400,8
Затраты по доп. заработной плате исполнителей темы	25260,13
Отчисления во внебюджетные фонды	23535
Затраты на электроэнергию	2853,62
Бюджет затрат	242285,55

#### 4.5 Ресурсоэффективность

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с



определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трёх вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{ФИНР}}^{\text{ИСП}i} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5.13)$$

где  $\Phi_{Pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.14)$$

В таблице 13 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Данный проект сравнивается с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Способствует росту производительности труда	0.2	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.13	4	4
Энергосбережение	0.25	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.22	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4.45	4.25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определённой задачи.

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5 = 4.45$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по следующей формуле:

$$I_{\text{ИСП}} = \frac{I_{Pi}}{I_{\text{ФИНР}}}, \quad (5.15)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{СР}} = \frac{I_{\text{Д.П.}}}{I_{\text{ИСП}}}, \quad (5.16)$$

В таблице 14 представлена сравнительная эффективность данного проекта с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 14 – Сравнительная эффективность

Показатели	Данный проект	Базовая методика качественного анализа материалов
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Анализируя данные таблицы 14, разработанная методика эффективнее стандартной. Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Из анализа выяснили, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабостей, что свидетельствует о перспективности исследования. Сильными сторонами можно назвать то, что технология является экономичной, энергоэффективной и экологичной, имеет маленький срок готовых результатов при проведении научного исследования и имеет квалифицированный персонал. К слабым сторонам можно отнести отсутствие прототипа научной разработки, Недостаток финансовых средств, большой срок поставок материалов .

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет бюджета исследования по материальным затратам (2370 руб.), затратам на специальное оборудование для научной работы (19866руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей тем (168400,8 руб.), затратам по дополнительной заработной плате (9471,71 руб.), отчислениям во внебюджетные фонды, затратам на электроэнергию (235352853.62руб.). Всего бюджет составил 242285,55руб.

Проведена оценка результатов ресурсоэффективности, которая составила 4,45 из 5, что говорит о хорошей эффективности реализации технического проекта.

Проведение такого рода оценки коммерческой ценности необходимо, чтобы оценить состояние и перспективы проводимых научных исследований.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
150Б91	Ню Сьяо

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/ООП/ОПОП</b>	03.03.02 Физика

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: молекулы типа сферического волчка</p> <p>Область применения: астрофизика, планетология</p> <p>Рабочая зона: лаборатория</p> <p>Размеры помещения климатическая зона*): 5.3*4.7м</p> <p>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: персональный компьютер</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</p> <p>анализ и моделирование спектров с помощью компьютерного программного обеспечения</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <p>специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</p>	<p>ТК РФ Статья 92. Сокращенная продолжительность рабочего времени;</p> <p>ТК РФ Статья 116. Ежегодные дополнительные оплачиваемые отпуска;</p> <p>ТК РФ Статья 108. Перерывы для отдыха и питания;</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Электробезопасность;</li> <li>2. Факторы пожарной и взрывной природы.</li> </ol> <p><b>Вредные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отклонение показателей микроклимата;</li> <li>2. Недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>3. Превышение уровня шума;</li> <li>4. Повышенный уровень</li> </ol> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</b> применить звукопоглощающее покрытие стен, экранировку рабочего места и установить менее шумный кондиционер; применить антистатическую обувь, антистатический халат, заземляющие браслеты.</p> <p><b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения, световой поток светильника.</p>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Лаборатория является не производственной, а это означает, что отсутствует производственный мусор (в том числе и пожароопасный, и вредный для окружающей среды).
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p><b>Возможные ЧС:</b> Природные катастрофы (наводнения, цунами, ураган, морозы, диверсия и т.д.);          Геологические воздействия (землетрясения, оползни, обвалы, провалы территории и т.д.);          Техногенные аварии (отказ систем безопасности; нарушение контроля и управления цепной ядерной реакции в активной зоне реактора; тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ, пожар)</p> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> сильные морозы и диверсия.</p>

Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком	20.04.2023
---	------------

**Задание выдал консультант по разделу «Социальная ответственность»:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Сечин А.И.	Д. ф.-м. н., профессор		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б91	Сунь Юйхань		

## ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

Изучение спектра Рамана углеродного волокна при высоких температурах и давлении включает в себя работу различных устройств. Внутреннее углеродное волокно подвергается давлению с помощью компактного пресса, и полученный спектр Рамана исследует изменения внутренней структуры углеродного волокна при высоком давлении. Таким образом, это исследование оказывает влияние на компрессорные установки, спектрометры Рамана, лазерные нагреватели и поэтому требует анализа и обработки результатов.

### 5.1 Производственная безопасность

Исследовательские устройства включают спектрометр Рамана, лазерный нагревательный прибор и рентгеновский дифрактометр, а также микроскоп, компрессор, гаечный ключ и т.д. Поэтому они могут подвергаться воздействию следующих вредных факторов:

1. Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте;
2. Электромагнитное излучение;
3. Шум.

Также возможно воздействие следующих опасных производственных факторов:

1. Электрическое напряжение;
2. Пожарная и взрывная природа.

#### 5.1.1 Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте

Микроклимат производственных помещений определяется воздействием температуры, влажности и скорости воздуха на организм человека. Отклонения от этих параметров могут иметь пагубные последствия для людей, часто приводя к ухудшению здоровья, неэффективной работе и различным заболеваниям.

Неблагоприятные условия могут привести к перенапряжению органов регулирования температуры, что приведет к перегреву или переохлаждению тела.

Высокая температура может привести к быстрой усталости сотрудников и может привести к перегреву или тепловому удару. Низкие температуры приводят к локальному или общему снижению температуры, вызывая простуду или обморожение. Высокая относительная влажность заставляет тело перегреваться при высоких температурах, увеличивая тепловой выход на поверхность кожи при низких температурах. Низкая влажность вызывает дискомфорт у работников с сухой слизистой оболочкой дыхательных путей.

Для облегчения работы в помещениях необходимо стандартизировать микроклиматические параметры (таблица 5.1) и принять защитные меры для предотвращения вредных последствий отклонения микроклиматических параметров.

Таблица 5.1 Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96).

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Иб (140-174)	21-23	60-40	0,2
Теплый	Иб (140-174)	22-24	60-40	0,2

### 5.1.2 Электромагнитное излучение

Исследование проводилось использование персональных компьютеров. В то же время для инженеров - исследователей основными вредными факторами являются электромагнитное излучение, которое влияет на костную ткань, ухудшает зрение, повышает усталость, снижает память и вызывает рак.

Таблица 5.2 Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м

Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 и представлены в табл. 5.2.

### 5.1.3 Шум

Длительное воздействие шума может привести к снижению слуха, а в некоторых случаях и к глухоте. Шумовое загрязнение на рабочем месте может негативно сказаться на работнике: снижение внимания, увеличение потребления энергии при физической активности и замедление психологической реакции. Это снижает производительность и качество работы.

Стандартизация шума направлена на предотвращение потери слуха и снижение эффективности и производительности труда сотрудников. Для различных типов шума существуют различные нормативные подходы.

Для последовательного шума уровень акустического давления устанавливается в диапазоне умножения средней геометрической частоты 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Для нестационарного шума тот же уровень звука также нормализуется. Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах, в офисах, жилых и общественных зданиях и в их зонах различны.

В соответствии с ГОСТ 12.1.003 - 83 должны быть приняты все необходимые меры для снижения уровня шума, затрагивающего человека, до уровня, не превышающего допустимых значений при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производстве зданий и сооружений и организации рабочего места.

Методы и средства коллективной защиты можно разделить на архитектурную акустику, архитектурное планирование и организационные методы в зависимости от способа осуществления, включая:



1. изменение направленности излучения шума;
2. рациональную планировку предприятий и производственных помещений;
3. акустическую обработку помещений;
4. применение звукоизоляции.

Наиболее эффективны средства индивидуальной защиты (СИЗ), как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

#### **5.1.4 Электробезопасность**

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

1. Случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
2. Появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
3. Шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;
4. Появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;
5. Освобождение другого человека, находящегося под напряжением;
6. Воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6-16 мА). Защита от воздействия электрического тока

осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Глава 12 1.019 Конструкция, технические методы и защитные меры электрооборудования обеспечивают электрическую безопасность. Электрическое оборудование и его компоненты должны быть сконструированы таким образом, чтобы рабочие были защищены от опасного и вредного воздействия электрического тока и электромагнитного поля и отвечали требованиям электрической безопасности.

Согласно PUE 7.4 « Принципы электромонтажа», помещение, в котором находится оборудование, используемое для нанесения оксидов титана и оксидов на стальную подложку, относится к помещениям без высокого риска, высокого риска или особых опасных условий. Эти условия включают: влажность (влажность более 75%) проводящая пыль, проводящий пол (металл, почва, железобетон, кирпич и т.д.); Высокая температура (выше 35°C); С одной стороны, человек может одновременно соприкоснуться с металлическим покрытием технических устройств, машин и электрооборудования, связанных с Землей. Согласно ГОСТ 12.1.038 - 82 SSBT, в лаборатории имеется электрическое оборудование с классом напряжения до 1 кВ, где максимально допустимые значения токовой безопасности, напряжения и сопротивления не могут превышать 0,1 мА, 36 В и 4 Ом соответственно.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
6. средства индивидуальной защиты и предохранительные приспособления: диэлектрические перчатки, галоши, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические резиновые ковры, указатели напряжения.

### **5.1.5 Пожарная безопасность**

Согласно плану национальной безопасности 105 - 03, используемые помещения классифицируются как места пожара класса В4, содержащие легковоспламеняющиеся и невоспламеняющиеся жидкости, вещества и материалы (включая пыль и волокна), но конкретная пожарная нагрузка на месте составляет от 1 до 180 МДж/м<sup>2</sup>. В соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2013 года лабораториями разработаны инструкции по мерам пожарной безопасности в зонах взрывов, пожаров и пожаров (мастерских, мастерских и т.д.). Технический регламент № 123 о требованиях пожарной безопасности.

Согласно правилам Службы национальной безопасности 105-95 и Службы национальной безопасности 21-01-97, сотрудники могут находиться на рабочем месте только после прохождения подготовки по мерам пожарной безопасности. Во всех комнатах установлены указатели с номерами пожарных телефонов, маршрутами эвакуации и инструкциями по плану эвакуации.

Согласно НПБ 105-95 и СНиП 21-01-97 в здании, где ведутся работы, предусмотрены инженерно-технические решения, которые обеспечивают в случае пожара эвакуацию людей (аварийные выходы), подачу средств пожаротушения к очагу, есть сигнализация и работает оповещение о пожаре.

Пожарные краны, огнетушители и другая пожарная техника для защиты объектов соответствует (ГОСТ 12.1.004-91 с измен. 21.10.1993 г).

Из огнетушителей разных видов наиболее широко используются углекислотные, порошковые и воздушно-пенные. Огнетушители воздушно-пенные используются при тушении пожаров классов А и В (дерево, краски и ГСМ) не допускается применять для тушения электроустановок под напряжением, а также щелочных металлов; эксплуатируются при температуре от +5 до +50°C.

Порошковые огнетушители используются в качестве первичного средства тушения пожаров класса А (твердых веществ), В (жидких веществ), С (газообразных веществ) и электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В; огнетушители не пригодны для тушения загораний щелочных и щелочноземельных металлов и других материалов, горение которых может происходить без доступа воздуха.

## **5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности**

Для обеспечения безопасности перед началом работ необходимо правильно надеть комбинезон, подготовить необходимые для работы инструменты и аксессуары и подготовить рабочий стол. Следует также проверить электрооборудование на наличие внешних повреждений, а также контрольно - измерительное и сигнальное оборудование, компьютеры, переключатели и т.д. В случае обнаружения дефекта необходимо сообщить об этом руководителю лаборатории.

В случае обнаружения неисправности любого используемого оборудования, истечения срока периодической проверки баллонов, истечения

срока проверки манометров, а также в случае, если персонал не прошел подготовку по вопросам безопасности труда и проверку знаний в установленном порядке, запрещается начинать работу.

Работа с установкой должна производиться в чистом помещении, свободном от пыли, паров, кислот и щелочей, агрессивных газов и других вредных примесей, вызывающих коррозию. Недопустимо наличие открытого огня около прибора.

После окончания работы с установкой необходимо:

1. Убедиться, что все клапаны контроллера закрыты;
2. Выйти из программы, отключить питание компьютера;
3. Отключить установку и насос от электросети.

### **5.3 Охрана окружающей среды**

При этом отходы представляют собой металлический порошок, образующийся в результате очистки помещений и других компонентов оборудования.

Порошок состоит в основном из стали, титана и оксида титана. Чтобы переработать эти отходы, первым шагом является их разделение и использование магнитов. Эти отходы подразделяются на две подкатегории: сталь и оксид титана, которые необходимо транспортировать на специализированные перерабатывающие станции.

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

Чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде,

значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Первый случай: остановка производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

2. Обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования вод питания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т..).

4. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Должна быть разработана схема аварийного выпуска сточных вод непосредственно в водоемы. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, комплектуются надежными источниками электропитания.

Второй случай: диверсия.

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновении посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.
2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.
3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

### **5.5 Перечень законодательного документа**

К работе на установке для исследования термо- и радиационно-стимулированного газовыделения допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинские противопоказания, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте.

К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний норма и правил работы с электроустановками, правил безопасности работы с газовыми баллонами, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы на установке для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения , имеющие не менее II группы по электробезопасности и получившие допуск к работе с газовыми баллонами.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения

инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

По данной теме рассматриваются законодательный и нормативные документы:

1. инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;

2. инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.

Документы по воздействию ПЭВМ:

1. Инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;

2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы;

3. ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности;

4. ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности;

Микроклимат:

1. ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;

2. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

Шум:

1. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.

2. СНиП-12-77. Защита от шума.



## **Вывод по главе**

В ходе проверки на безопасность и гигиену покрытия оборудования для испытаний теплового и радиационного стимула выявляются вредные и опасные факторы, защитные меры и мероприятия на рабочем месте, учитываются аварийные ситуации и их поведение, а также вводится порядок эксплуатации оборудования. Для обеспечения безопасности жизни необходимо работать в соответствии с правилами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе углеродное нановолокно выбрано в качестве экспериментального объекта исследования. Используя экстремальные условия высокого давления и высокой температуры и высокого давления для углубленного изучения структурных изменений углеродного нановолокна в экстремальных условиях. Результаты исследований помогают лучше понять механизм действия углеродных нановолокон в экстремальных условиях, таких как высокие температуры и высокое давление, а результаты экспериментов будут служить руководством для применения углеродных нановолокон в экстремальных условиях.

При комнатной температуре и высоком давлении образец был структурно представлен с использованием спектра Рамана и электронных микрофотографий. Установлено, что в спектре Рамана углеродного нановолокна при высоком давлении и комнатной температуре наблюдалось синее смещение, что указывает на отсутствие структурных изменений в этом процессе. Таким образом, можно сделать вывод о том, что углеродные нановолокна более стабильны при комнатной температуре и высоком давлении. В то же время, было проведено сравнение углеродных нановолокон с графитовыми микроволнами и обнаружено, что причина большей стабильности углеродных нановолокон в условиях высокого давления заключается в том, что углеродные нановолокна имеют меньший диаметр, более низкое одноосное напряжение и высокую неупорядоченность.

Использование алмазной наковальни позволяет исследовать углеродных нановолокон в условиях высокой температуры и высокого давления с использованием лазерного нагрева и достигать условий 25 ГПа и более 2000°C. Используя рамановскую спектроскопию для представления образцов, было обнаружено, что G-пик в спектре Рамана имеет очевидный широкий пакет. Для дальнейшего определения причины формирования феномена с широким пакетом был проведен зеркальный анализ образцов после снятия давления, что

подтвердило не только графитизацию волокна в процессе лазерного нагрева и высокого давления, но и сдвиг в режиме  $sp^2 - sp^3$  перехода, в результате чего образуются алмазные кристаллы.

Также было проведено сравнение углеродного нановолокна при высоких температурах и давлении со стекловолокном при тех же условиях. Было обнаружено, что оба образца имели одинаковые результаты при одинаковых условиях, поэтому разумно предполагать, что оба образца представлены аморфными углеродом с низкой степенью графитизации, а также  $sp^2$ -гибридизированном более неупорядоченным углеродным материалом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 张新元, 何碧霞, 李建利等. 高性能碳纤维的性能及其应用[J]. 棉纺织技术, 2011, 39(04): 65-68.
- [2] 徐进, 张伟, 林洪芹等. 纺织复合材料在风力发电机叶片制造中的应用[J]. 棉纺织技术, 2010, 38(05): 22-24.
- [3] 郝俊杰, 吕春祥, 李登华等. 碳纤维微观结构表征: Raman光谱[J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 227-233. 2020-0507.
- [4] FRANKLIN Rosalind E. Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1951, 209(1097): 196-218.
- [5] WARNER Jamie H, MARGINE Elena Roxana, MUKAI Masaki, et al. Isolation-driven deformations in graphene[J]. Science, 2012, 337(6091): 209-212.
- [6] 贺福. 用拉曼光谱研究碳纤维的结构[J]. 高科技纤维与应用, 2005(06): 20-25.
- [7] LI R, GONG W, HE Q, et al. Joining cross-stacked carbon nanotube architecture with covalent bonding[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(18):
- [8] YUSA H, TAKEMURA K, MATSUI Y, et al. Direct transformation of graphite to cubic diamond observed in a laser-heated diamond anvil cell[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(15): 1843-1845.
- [9] LI Denghua, LU Chunxiang, WU Gangping, et al. Heat-induced internal strain relaxation and its effect on the microstructure of polyacrylonitrile-based carbon fiber[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(10): 1051-1058.
- [10] Mao H K, Jephcoat A P, Hemley R J, et al. Synchrotron X-ray Diffraction Measurements of Single-Crystal Hydrogen to 26.5 Gigapascals[J]. Science, 1988, 239(4844): 1131-1134.
- [11] 石彦平. 拉曼光谱研究碳纤维的微观结构和性能[D]. 东华大学, 2011.
- [12] Michael B, Derek J. Determination of band shifts as a function of strain in

n carbon fibers using Raman microline focus spectrometry (MIFS)[J]. Carbon, 1993, 31: 1057-1064

[14] 焦璐. 叠氮化钠的高压剪切相变研究[D]. 吉林大学, 2021. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2021.004595.

[15] 付广艳. 掺钕的双钨酸盐Nd: NaY (W04) 2的高压物性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

[16] 张辰, 王绍斌, 冯秀鹏等. 基于高温高压技术的合成压力和温度测量技术研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(08): 129-131. DOI:10.19981/j.cnki.11581/G3.2022.08.043.

[17] Perret R, Ruland W. The microstructure of PAN-based carbon fibers[J]. Journal of Applied Crystallography, 1970, 3: 525-532.

[18] Tokarsky E W, Diefendorf. R J. Relationships between three-dimensional structural models and properties in carbon fibers[J]. Carbon, 1973, 11(6): 676-685.

[19] Bennett S C, Johnson D J. Electron-microscope studies of structural heterogeneity in PAN-based carbon fibers[J]. Carbon, 1979, 17(1): 25-39.

[20] MAO W L, MAO H K, ENG P J, et al. Bonding changes in compressed superhard graphite[J]. Science, 2003, 302(5644): 425-427.

[21] WANG Z W, ZHAO Y S, TAIT K, et al. A quenchable superhard carbon phase synthesized by cold compression of carbon nanotubes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(38): 13699-13702.

[22] 李登华. 高强高模碳纤维制备过程中微观结构的演变规律[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

[23] SHANG Y, LIU Z, DONG J, et al. Ultrahard bulk amorphous carbon from collapsed fullerene[J]. Nature, 2021, 599(7886): 599-604.

[24] TANG H, YUAN X, CHENG Y, et al. Synthesis of paracrystalline diamond[J]. Nature, 2021, 599(7886): 605-610.

[25] ZHANG SS, LIZ H, LUO K, et al. Discovery of carbon-based strongest a

nd hardest amorphous material[J]. National Science Review, 2021, 9(1):nwab140.

[26] 侯锋辉, 邓红兵, 李崇俊等. 碳纤维结构的常用表征技术[J]. 纤维复合材料, 2008, 25(3):18-20, 31. DOI:10.3969/j.issn.1003-6423.2008.03.005.

[27] K.M.Kearns,D.P.Anderson,A.A.Ogale, et al.Orientation and dimensional changes in mesophase pitch-based carbon fibers[J].Carbon: An International Journal Sponsored by the American Carbon Society.2002,40(8).1309-1319.

[28] DIBIASOVA L., STARY V., GLOGAR P. et al. Analysis of carbon fibers and carbon composites by asymmetric X-ray diffraction technique[J]. Carbon: An International Journal Sponsored by the American Carbon Society,1999,37(3):421-425.

[29] K. Papagelis, J. Arvanitidis, D. Christofilos, et al. High-pressure Raman study of stacked-cup carbon nanofibers, High Pressure Research,2011 31:1, 131-135,

[30] Melanitis, N., Tetlow, P.L., Galiotis, C. et al. Compressional behaviour of carbon fibres. Journal of Materials Science 29, 786-799 (1994)

[31] Bundy F P, Hall H T, Strong H.M., et al. Man-Made Diamonds[J]. Nature, 1955,176(4471): 51-55.

[32] Lin Y, Zhang L, Mao H K, et al. Amorphous diamond: a high-pressure superhard carbon allotrope[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(17): 175504.

[33] [1]贾海波. 激光石墨化碳纤维微观结构与宏观力学性能的关系研究[D]. 北京化工大学, 2021. DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2021.000718.

[34] 李昭君, 刘亮光, 李建林. 高温下压力对聚丙烯腈基碳纤维结构的影响[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(5):834-841

[35] 冯炎青, 沈洋, 游泳. 碳纤维材料残余应力的拉曼光谱试验[J]. 无损检测, 2019, 41(8):20-23

[36] 李登华. 高强高模碳纤维制备过程中微观结构的演变规律[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

[37] Yao M, Xiao J, Fan X, et al. Transparent, superhard amorphous carbon phase from compressing glassy carbon [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104

(2): 021916.

[38] compressed glassy carbon [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(10): 101901. Yao M, Fan X, Zhang W, et al. Uniaxial-stress-driven transformation in cold

[39] 董家君. 高压下石墨与玻璃碳结构转变研究[D]. 吉林大学, 2020.